

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ADEQUAÇÃO DOS FILTROS DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA BRASÍLIA – AVALIAÇÃO EM  
ESCALA PILOTO**

**MATHEUS ALMEIDA FERREIRA**

**ORIENTADORA: CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ADEQUAÇÃO DOS FILTROS DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA BRASÍLIA – AVALIAÇÃO EM  
ESCALA PILOTO**

**MATHEUS ALMEIDA FERREIRA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

**APROVADA POR:**

---

**CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**YOVANKA PÉREZ GINORIS, DSc (UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**CLAUDIA PATRICIA PEREIRA SIMÕES, (Caesb)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 07 DE DEZEMBRO DE 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, MATHEUS ALMEIDA

Adequação dos filtros da Estação de Tratamento de Água Brasília – Avaliação em escala piloto. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 95 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Taxa declinante variável

2. Filtração rápida descendente

3. ETA Brasília

4. Instalação piloto

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, M. A. (2018). Adequação dos filtros da Estação de Tratamento de Água Brasília – Avaliação em escala piloto. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Almeida Ferreira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Adequação dos filtros da Estação de Tratamento de Água Brasília – Avaliação em escala piloto.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Matheus Almeida Ferreira  
[matheuss.almeida@hotmail.com](mailto:matheuss.almeida@hotmail.com)

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Lêda, que sempre me inspirou e é meu exemplo de perseverança e humildade. Além de me oferecer amor, sempre fez o possível e o impossível para que eu tivesse uma educação de qualidade, contribuindo para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje. Aos meus irmãos e aos demais membros de minha família, pelo apoio e compreensão.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e foram compreensivos com as minhas ausências durante a execução deste trabalho. Em especial à Carol, Pâmella e Romário.

À Professora Cristina, pela orientação e apoio durante este trabalho, pela confiança deposita em mim, por toda a generosidade e incansável disposição em ajudar, inclusive nos trabalhos braçais. À Professora Yovanka, pelos incentivos, suporte e troca de informações.

À Marcilene, Sara, Carla e Manuela, pelo suporte e pela companhia durante as horas gastas no laboratório. Em especial à Marcilene, pelo senso de humor, tornando as atividades mais divertidas. À Iara, pela companhia no laboratório e na fase final deste trabalho.

À Caesb, por permitir o desenvolvimento deste trabalho como parte do meu estágio na companhia. Ao Fuad, Claudia Morato e, em especial, Claudia Simões, que participou de forma mais próxima do desenvolvimento deste trabalho, com ânimo e disposição para ajudar.

Aos que não foram citados, mas que contribuíram de alguma forma, muito obrigado!

## RESUMO

As alterações naturais ou antrópicas da qualidade da água de mananciais de captação de água para consumo humano demandam constantes estudos de tratabilidade para adequação do tratamento às novas características da água. Neste sentido, a Estação de Tratamento de Água Brasília, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, tem enfrentado grandes desafios operacionais relacionados às unidades de filtração da estação, tanto pela alteração das características dos mananciais de captação quanto por problemas nas estruturas de controle do modo de operação dos filtros. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar a adequação do meio filtrante e o modo de operação da ETA Brasília, com vistas à melhoria da qualidade da água produzida e, por conseguinte, a maior segurança microbiológica. Para tal, foram testados, em escala piloto, dois meios filtrantes: o meio filtrante de camada simples de areia (FA) e o meio filtrante de camada dupla de antracito e areia (FAA). Foram analisados dois cenários: no cenário 1 os experimentos foram realizados com taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d com água de alimentação dos filtros clarificada; e no cenário 2 foram realizados experimentos com taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d com água de alimentação dos filtros clarificada e coagulada na própria ETA Brasília. No primeiro cenário, a duração média das carreiras de filtração obtidas para a ETA Brasília foi de 40 horas para o filtro de areia FA e de 24 horas para o filtro de areia e antracito FAA. Já no segundo cenário estudado, para água clarificada e floculada, as durações médias das carreias de filtração foram de 49 horas (com água clarificada) e 9 horas (com água floculada) para o filtro de areia FA e de 30 horas (com água clarificada) e 8 horas (com água floculada) para o filtro de areia e antracito FAA. Apesar de o filtro de antracito e areia FAA não ter apresentado o melhor desempenho com relação a duração das carreias de filtração, foi concluído no presente trabalho que o filtro FAA é mais recomendado para ETA Brasília, em função da melhor qualidade da água produzida.

**Palavras chave:** Taxa declinante variável, filtração rápida descendente, ETA Brasília, instalação piloto

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	DESCRIÇÃO DA ETA BRASÍLIA.....	5
3.2	FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE POR GRAVIDADE.....	11
3.3	MODOS DE OPERAÇÃO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE.....	15
3.3.1	Hidráulica da Filtração.....	15
3.3.2	Filtração com Taxa Constante.....	16
3.3.3	Filtração com Taxa Declinante.....	19
3.4	MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE.....	23
3.4.1	Modelo de Bi Bernardo (1986).....	23
3.4.2	Modelo de Machado e Di Bernardo (1995).....	29
3.5	ESTUDOS SOBRE A FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL E A INFLUÊNCIA DO MEIO FILTRANTE.....	33
4	METODOLOGIA.....	39
4.1	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO.....	39
4.2	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DA etapa I – Taxa de filtração de 455,3 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d.....	52
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DA etapa II, taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d.....	61
6	CONCLUSÃO.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma de tratamento da ETA Brasília. ....	8
Figura 3.2 – Visão geral da ETA Brasília (Google Earth, 2017). ....	9
Figura 3.3 – Representação dos mecanismos de transporte, aderência e desprendimento (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008). ....	13
Figura 3.4 – Diagrama de pressão em um filtro de taxa e nível constantes (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008). ....	18
Figura 3.5 – Arranjo típico de um filtro de taxa declinante variável (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008). ....	20
Figura 3.6 – Configuração típica de um sistema com taxa declinante variável constituído de quatro filtros em situação repetitiva (Di Bernardo, 1993). ....	21
Figura 3.7 – Nível de água no CCAF em uma bateria com quatro filtros de taxa declinante (Eyvaz et al., 2013, com modificações). ....	22
Figura 3.8 – Variação do nível de água no CCAF em função da taxa de filtração e das perdas de carga turbulenta e laminar ( Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008). ....	25
Figura 3.9 – Variação do nível de água no CCAF em função da taxa de filtração e das perdas de carga turbulenta e laminar, com armazenamento a montante dos filtros (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008). ....	30
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia adotada. ....	39
Figura 4.2 – Esquema da instalação piloto de filtração. ....	41
Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos meios filtrantes estudados: (a) filtro de areia FA e (b) filtro de antracito e areia FAA. ....	42
Figura 4.4 - Montagem dos meios filtrantes e da camada suporte. ....	43
Figura 4.5 – Detalhe dos filtros piloto e dos pontos de tomada de pressão, em centímetros. ....	44
Figura 4.6 – Configuração final da instalação piloto de filtração. ....	44
Figura 4.7 – Reservatório de nível constante para controle da vazão de alimentação dos filtros. ....	45
Figura 4.8 – Sistema de lavagem dos filtros. ....	46
Figura 4.9 – Variação típica da perda de carga em um filtro de taxa declinante. Fonte: Di Bernardo e Sagobal Paz, 2008. ....	48
Figura 5.1 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração	

de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	53
Figura 5.2 –Turbidez ao longo das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	54
Figura 5.3 – Comparação entre a turbidez inicial e residual nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	55
Figura 5.4 – Comportamento da perda de carga nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada). ....	57
Figura 5.5 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	61
Figura 5.6 –Turbidez ao longo das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	62
Figura 5.7 – Comparação entre a turbidez inicial e residual nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	63
Figura 5.8 – Comportamento da perda de carga nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada). ....	65
Figura 5.9 – Análise dos flocos na água coagulada com aumento de 50 x: (a) antes do bombeamento e (b) após o bombeamento. ....	68
Figura 5.10 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de antracito e areia FAA. ....	69
Figura 5.12 – Turbidez ao longo da duração das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA, água de alimentação; (b) filtro de areia FA, água filtrada e (c) filtro de areia e antracito FAA, água de alimentação; e (d) filtro de areia e antracito FAA, água filtrada. ..	70
Figura 5.13 – Comparação da remoção de turbidez, na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA. ....	71
Figura 5.14 – Perdas de carga totais nos experimentos da etapa II, (taxa de filtração de	



361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada).....	73
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Descrição dos sistemas produtores de água do DF (Siagua, 2014). .....	5
Tabela 3.2 – Características granulométricas do meio filtrante da ETA Brasília (Caesb, 2011). .....	10
Tabela 3.3 – Taxas de filtração características das filtrações rápida e lenta. ....	12
Tabela 3.4 – Propriedades típicas do meio filtrante em filtros rápidos (Howe <i>et al.</i> 2012, modificado). ....	15
Tabela 3.5 – Descrição das características gerais dos métodos de operação de filtros (Arboleda 1974, <i>apud</i> Gabriel, 2000). ....	16
Tabela 3.6 – Taxas de filtração, perdas de carga, coeficiente de resistividade e equações básica do modelo de Bi Bernardo (Di Bernardo e Dantas, 2005). ....	26
Tabela 3.7 – Nível $N_{3c}$ e as taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles do modelo de Di Bernardo (Di Bernardo e Dantas, 2005). ....	28
Tabela 3.8 – Taxas de filtração, perdas de carga, coeficiente de resistividade e equações básicas do modelo de Machado e Di Bernardo (Machado e Di Bernardo, 1995). ....	31
Tabela 3.9 – Nível $N_{3c}$ e as taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles do modelo de Machado e Di Bernardo (1995). ....	32
Tabela 4.1 – Características das camadas filtrantes adotadas. ....	42
Tabela 4.2 - Dados de entrada e saída do modelo de filtração para os cenários 1 e 2. ....	49
Tabela 4.3 – Metodologia a ser utilizada para determinação dos parâmetros monitorados. ....	51
Tabela 5.1 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FA. ....	56
Tabela 5.2 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FAA. ....	56
Tabela 5.3 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada). ....	58
Tabela 5.4 – Duração das carreiras de filtração estimadas para a ETA operando em taxa declinante variável na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada). ....	60

Tabela 5.5 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FA.....	64
Tabela 5.6 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FAA.....	64
Tabela 5.7 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada). .....	66
Tabela 5.8 – Duração das carreiras de filtração estimadas para a ETA operando em taxa declinante variável na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação clarificada).....	67
Tabela 5.9 – Valores médios da cor aparente e turbidez da água bruta (AB) e de turbidez da água clarificada (AC) monitorados na ETA durante os experimentos da Etapa II, (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada).....	71
Tabela 5.10 – Valores médios da turbidez da água de alimentação e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada), nos filtros de areia FA e de areia e antracito FAA.....	72
Tabela 5.11 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada). 74	
Tabela 5.12 – Duração das carreiras de filtração nos filtros piloto nos experimentos da Etapa II, (taxa de filtração de 361,73 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d e água de alimentação floculada).. .....	74
Tabela 5.13 - Resumo da estimativa da duração das carreiras de filtração para a ETA Brasília, operando em taxa declinante variável. ....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$\propto$  – Proporcional.

$\mu$  – micro.

AC – Água Clarificada.

AF – Água Filtrada.

AFI – Água Floculada.

BN – Córrego Bananal.

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CCAF – Canal comum de alimentação dos filtros.

CU – Coeficiente de Uniformidade.

d – dia.

DF – Distrito Federal.

ETA – Estação de Tratamento de Água.

FA – Filtro de Camada Simples de Areia.

FAA – Filtro de Camada Dupla de Areia e Antracito.

g – Grama.

Kg – quilograma.

m – metro

mm – milímetro.

MOHS – unidade de dureza.

MS – Ministério da Saúde.

$N_{0C}$  – Nível de água na crista do vertedor de saída dos filtros.

$N_{1C}$  – Nível mínimo no canal comum de alimentação dos filtros.

$N_{2C}$  – Nível no canal comum de alimentação dos filtros, no qual o filtro mais sujo da bateria deve ser retirado de operação para lavagem.

$N_{3C}$  – Nível no canal comum de alimentação dos filtros imediatamente antes de um filtro recém lavado ser recolocado em operação.

Org – Organismos.

PAC – Policloreto de alumínio.

PDAD – Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios

pH – Potencial Hidrogeniônico.

PNSB – Política Nacional de Saúde Bucal.

PVC – Policloreto de vinila.

s – Segundo.

SAA – Sistema de Abastecimento de Água.

SIAGUA – Sinopse do Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal.

SM – Reservatório Santa Maria.

TR – Ribeirão do Torto.

uT – Unidade de Turbidez.

$V_{\infty}$  – Velocidade de aproximação.

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sociedade passou a lidar frequentemente com problemas ambientais. Dentre tais problemas, destaca-se a contaminação dos corpos hídricos, que decorre, principalmente, do uso e ocupação inadequados da bacia hidrográfica e do lançamento de efluentes, sobretudo os esgotos doméstico e industrial na zona urbana e os efluentes de atividades agrícolas na zona rural, sem tratamento ou tratados de forma ineficiente. Tal contaminação pode inviabilizar os usos que demandam maior qualidade da água ou elevar os custos do processo de tratamento, além de contribuir para a disseminação das doenças de origem e de veiculação hídrica.

Com a deterioração dos mananciais de captação de água para consumo humano, as tecnologias de tratamento, definidas como o conjunto de processos e operações realizado com o propósito de adequar as características físico-químicas e microbiológicas da água bruta com o padrão organolepticamente agradável e que não ofereça riscos à saúde humana (Di Bernardo, 2003), apresentam maior complexidade e necessidade de operação rigorosa.

As tecnologias de tratamento podem ser subdivididas em dois grupos, em função de apresentarem ou não a coagulação química como uma das etapas constituintes do processo de tratamento. Entretanto, independentemente do tipo de tratamento adotado, no Anexo XX da Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde (MS) nº 5 de 2017 é definido que as águas provenientes de mananciais superficiais devem ser submetidas a processos de filtração e que, após a filtração rápida e lenta, a água deve possuir turbidez remanescente inferior a 0,5 e 1,0 uT, respectivamente.

De acordo com Di Bernardo (1993), a filtração pode ser definida como o processo de remoção parcial de partículas suspensas e coloidais e de micro-organismos presentes na água que escoam através de um meio poroso.

Nas tecnologias tradicionais de tratamento de água para abastecimento público, a filtração geralmente é a última etapa (barreira física) do processo de remoção de impurezas e está inserida no contexto de múltiplas barreiras, que consiste em um sistema integrado de procedimentos, processos e ferramentas que, em conjunto, possui o propósito de prevenir e reduzir os riscos associados à contaminação da água potável, especialmente a contaminação

microbiológica, desde a fonte de captação até o usuário final (Torres *et al.*, 2014).

Neste contexto, a filtração possui papel de extrema importância na redução dos riscos de contaminação e, por conseguinte, na produção de água segura, em virtude da capacidade de remoção de micro-organismos patogênicos como *Cryptosporidium* e *Giardia*, que de acordo com Heller *et al.* (2004), quando se apresentam nas formas de os oocistos e cistos, respectivamente, são resistentes à desinfecção por cloração. Desta forma, a filtração também possui a função de garantir as condições adequadas para a desinfecção, por meio da remoção de turbidez, já que este parâmetro indica a presença de partículas em suspensão que podem proteger os organismos patogênicos da ação da desinfecção. Este fato justifica a exigência relativa à turbidez residual, definida no Anexo XX da Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde (MS) nº 5 de 2017, que estabelece que a turbidez remanescente na água filtrada deve ser inferior a 1 uT.

No Distrito Federal, umas das principais contribuintes para o Sistema de Abastecimento de Água (SAA) é a Estação de Tratamento de Água Brasília (ETA Brasília), que possui capacidade de produção de 2.800 L/s e é operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb). Esta estação, desde 2009, utiliza o tratamento em ciclo completo com flotação por ar dissolvido seguida de filtração rápida descendente.

As unidades de filtração da ETA Brasília foram projetadas para operar com taxa de filtração e nível de água constantes, entretanto falhas nos dispositivos de controle de vazão na saída dos filtros e problemas relacionados à carga hidráulica disponível têm ocasionado o surgimento de pressões negativas no interior do meio filtrante, criando bolhas de ar que reduzem a seção de escoamento e diminuem a duração da carreira de filtração (intervalo entre lavagens consecutivas de um filtro) e a produção de água tratada.

Este problema foi agravado em decorrência da alteração da qualidade dos mananciais de captação de água bruta (ribeirão do Torto e reservatório Santa Maria) para os quais a ETA foi projetada, além da incorporação ao sistema da captação no córrego Bananal, em função do cenário de crise hídrica ocorrido no Distrito Federal em 2017.

Com a utilização do córrego Bananal em substituição ao reservatório Santa Maria no período de seca, os filtros da estação passam a ser mais demandados, já que o córrego Bananal

apresenta água com elevada turbidez mineral, acarretando em dificuldades para a manutenção da turbidez residual da água filtrada inferior a 0,5 uT, fato que têm sido um grande desafio operacional na ETA Brasília. Ressalta-se ainda que a alteração da qualidade da água bruta reflete também na duração da carreira de filtração, que é reduzida quando a qualidade da água bruta diminui.

Desta forma, o presente trabalho tem como proposta estudar a adequação do meio filtrante e do modo de operação dos filtros da ETA Brasília a partir de experimentos de filtração realizados em instalação piloto, em função da importância da filtração para garantir principalmente a segurança microbiológica da água, além da produção efetiva de água na estação de tratamento.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho possui como objetivo geral a adequação do meio filtrante e do modo de operação dos filtros da ETA Brasília, localizada no Distrito Federal, com vista a garantir os padrões de qualidade da água filtrada definidos no Anexo XX da Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde (MS) nº 5 de 2017 e a segurança microbiológica da água tratada.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a influência das características do meio filtrante na duração da carreira de filtração dos filtros da ETA Brasília operando com taxa de filtração declinante e nível variável, a partir de instalação piloto operando com taxa de filtração constante e nível variável;
- Avaliar a influência da taxa de filtração sobre a duração da carreira de filtração;
- Avaliar o efeito das características do meio filtrante, submetido a duas taxas de filtração distintas, sobre a qualidade da água produzida.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA ETA BRASÍLIA

Segundo a Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD) referente ao ano de 2015, o Sistema de Abastecimento de Água (SAA) do Distrito Federal possui cobertura por rede geral de 98,14%. Este sistema é composto por cinco sistemas produtores, descritos na Tabela 3.1, são eles: Descoberto, Torto/Santa Maria, Sobradinho/Planaltina, São Sebastião e Brazlândia.

Tabela 3.1 – Descrição dos sistemas produtores de água do DF (Siagua, 2014).

<b>Descrição</b>	<b>Capacidade de Produção Instantânea (L/s)</b>	<b>Vazão Produzida (L/s)</b>	<b>Percentual da Captação (%)</b>	<b>População Atendida em 2013 (%)</b>
<b>Descoberto</b>	5.506,0	4.578,5	58,8	61,52
<b>Torto/Santa Maria</b>	2.629,1	2.148,2	27,7	20,15
<b>Sobradinho/Planaltina</b>	1.020,8	717,7	9,2	12,78
<b>São Sebastião</b>	256,4	211,5	2,7	3,37
<b>Brazlândia</b>	152,9	118,3	1,5	2,18
<b>Total DF</b>	9.565,2	7.774,2	100	100

A partir da Tabela 3.1, percebe-se que, em 2014, o sistema Torto/Santa Maria se apresenta como o segundo maior contribuinte para o sistema de abastecimento de água potável do Distrito Federal e é responsável por 27,7% do total de água produzida, abastecendo cerca de 20,1% da população atendida pela Caesb em 2013.

Os principais contribuintes para este sistema são os mananciais ribeirão do Torto e o reservatório Santa Maria, que possui área de 6,1 km<sup>2</sup> na bacia do córrego de mesmo nome, ambos localizados no Parque Nacional de Brasília. De acordo com a Sinopse do Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal (Siagua), publicada em 2014, o sistema Torto/Santa Maria possui disponibilidade hídrica de 3.361 L/s, apresentando em 2013 vazão média de água produzida de 2.148 L/s.

Em função do cenário de crise hídrica ocorrida no Distrito Federal em 2016 e 2017, o Sistema de Abastecimento de Água foi modificado, de modo que a contribuição dos mananciais do Torto/Santa Maria, acrescido da captação de água no ribeirão Bananal foi elevada, passando a ser de 36,35% (Alvarenga, 2018).

A água bruta do sistema Torto/Santa Maria é tratada pela ETA Brasília, que foi inaugurada em 1959 e é a estação de tratamento de água mais antiga do DF, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb).

Inicialmente, a ETA Brasília, projetada para tratar a água bruta do ribeirão do torto e do reservatório Santa Maria, foi concebida para operar com um sistema clarificador Pulsator (decantador com leito de lodo pulsante, que realiza simultaneamente coagulação, floculação e sedimentação) seguido de filtros rápidos com camada simples de areia.

Devido à problemas operacionais relacionados à sobrecargas e a unidades que necessitavam de reparos na estação, a Caesb decidiu avaliar a possibilidade de tratar a água do sistema Torto/Santa Maria por meio da filtração direta, uma vez que os custos para a expansão da estação e para o reparo das unidades danificadas seriam demasiadamente elevados.

Bratby (1986) realizou um estudo em escala piloto que teve o objetivo de definir as condições ótimas de operação para filtração direta na ETA Brasília e concluiu que a água dos mananciais de captação, por apresentar baixa turbidez e cor, era, na época, adequada para a filtração direta, sem a necessidade de pré-floculação.

Após a adequação da estação para o tratamento com filtração direta e apesar de ambos os mananciais estarem situados em área protegida e possuírem boa qualidade média, episódios sazonais naturais de degradação da qualidade, especificamente o aumento da turbidez e cor no ribeirão do Torto em períodos chuvosos e a ocorrência de florescimento de algas no reservatório Santa Maria, representavam um grande desafio para a operação da estação, que era obrigada a operar com altas doses de coagulante, ocasionando por vezes o transpasse de coagulante nos filtros e a piora da qualidade da água produzida (Barreto *et al.*, 2015).

Em decorrência destes desafios operacionais e da alteração da qualidade da água dos mananciais de captação, que passaram a apresentar características limitantes para tratamento por filtração direta, além da necessidade de expansão da capacidade de produção, foi realizado, em meados dos anos 90, um projeto de remodelagem da ETA Brasília. Neste projeto, foi proposto a implantação de um sistema flexível de tratamento, permitindo a operação em filtração direta descendente, através de um sistema de *bypass*, ou em ciclo completo com flotação por ar dissolvido, dependendo da qualidade da água dos mananciais de abastecimento.

Guimarães (2007) analisou alguns parâmetros limnológicos do reservatório Santa Maria e constatou que a água deste manancial possuía turbidez em torno de 2,1 uT, concentração de fitoplâncton de 1.870 org/mL, com predominância dos gêneros de algas *staurastrum* e *cosmarium*, apresentando valores médios de clorofila-a que variavam de 2 a 15 µg/L.

Águas com baixa turbidez e elevada concentração de algas são indicadas para a utilização de tratamento por flotação (Bof, 2007; Centurione Filho, 2002; entre outros), fato que reafirma a necessidade da alteração proposta no projeto de remodelagem da ETA Brasília, iniciado na década de 90.

Em 2009, a ETA Brasília foi remodelada para o tratamento em ciclo completo com flotação por ar dissolvido (Figura 3.1) e atualmente, apesar de possuir a alternativa operacional de tratamento com filtração direta descendente, a utilização deste sistema só ocorre em casos especiais como, por exemplo, quando o sistema de flotação estiver fora de operação ou quando estudos e necessidades operacionais assim a exigirem (Caesb, 2011).

Após esta última reforma, a ETA Brasília apresenta capacidade máxima de produção de 2.800 L/s de água tratada, que abastece as seguintes localidades: Asa Sul, Asa Norte, Cruzeiro, Sudoeste, Octogonal, Lago Norte, Paranoá, Itapoã, Lago Sul e Jardim Botânico. Na Figura 3.2 é apresentada uma visão geral da atual configuração de operação da ETA Brasília, evidenciando as principais unidades constituintes do processo de tratamento.

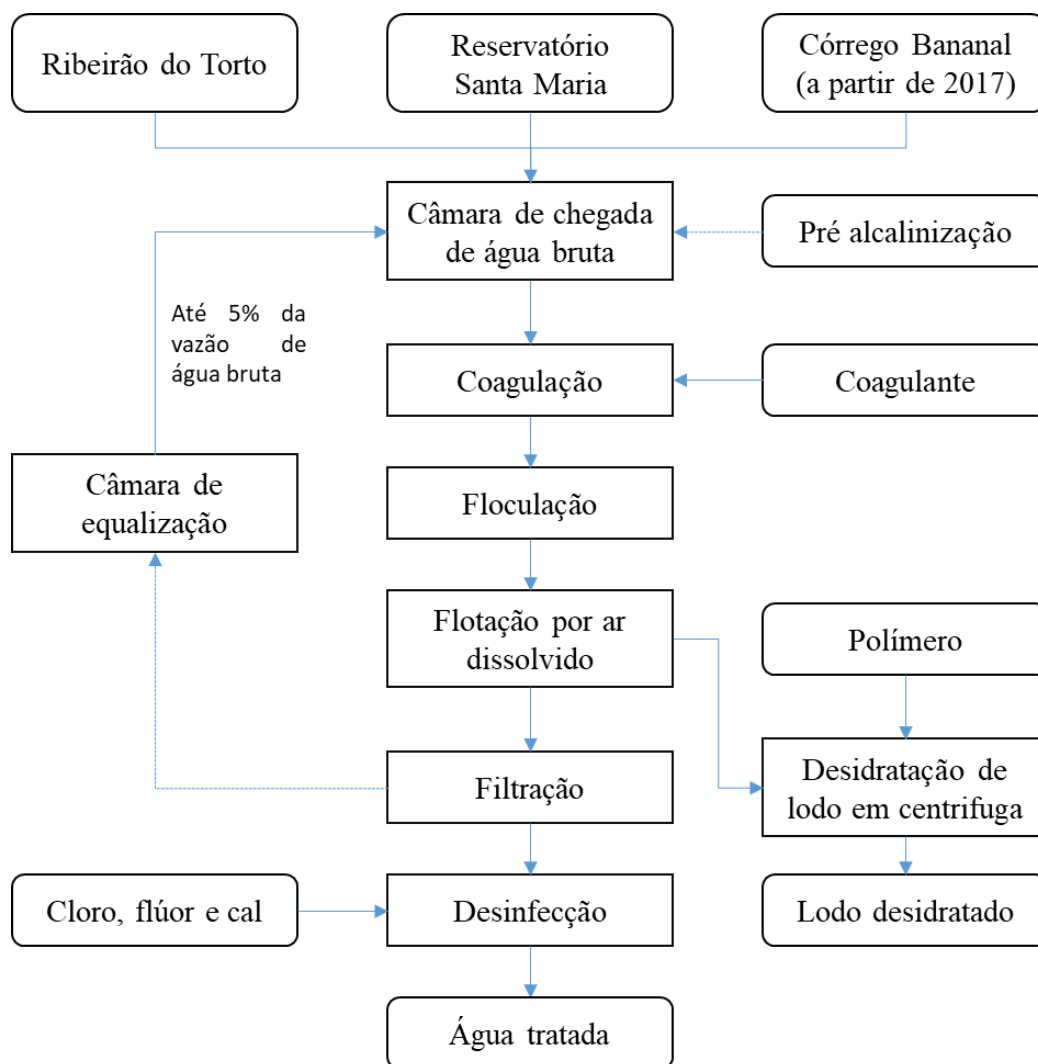


Figura 3.1 – Fluxograma de tratamento da ETA Brasília.

A ETA Brasília possui como unidade de mistura rápida a calha Parshall, na qual ocorre a coagulação através da utilização do coagulante policloreto de alumínio (PAC). Em seguida, a água coagulada é distribuída por meio do canal de água coagulada para 6 floculadores mecanizados. Cada floculador possui 3 câmaras de floculação com agitação mecânica e gradiente de velocidade decrescente. A água floculada é distribuída para 8 flotadores através do canal de água floculada. A flotação adotada é a flotação por ar dissolvido com saturação parcial de reciclo de água clarificada e o lodo gerado nesta etapa é adensado por centrifugação. A água clarificada é então encaminhada para os 24 filtros descendentes e a água filtrada é posteriormente direcionada para o tanque de contato, no qual ocorre a desinfecção, correção de pH e fluoretação, sendo este último devido à Política Nacional de Saúde Bucal (PNSB). Por fim, a água é armazenada no reservatório de distribuição e distribuída para a rede de abastecimento.

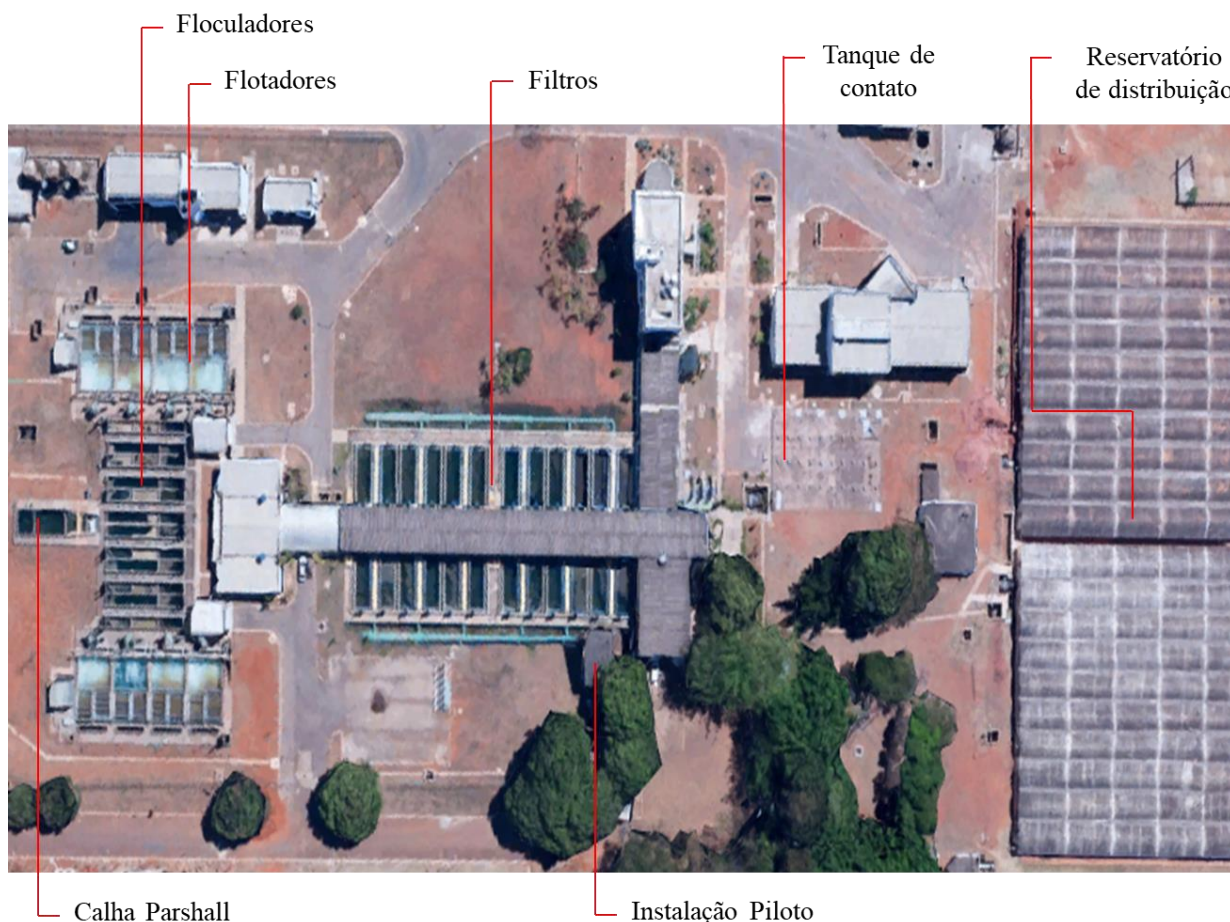


Figura 3.2 – Visão geral da ETA Brasília (Google Earth, 2017).

A fim de se obter maior compreensão do comportamento hidrodinâmico nos filtros, estas unidades serão melhor detalhadas. O sistema de filtração é composto por 24 filtros ligados em paralelo e dispostos em duas baterias, contendo 12 filtros cada. A entrada de água nos filtros é realizada através de comportas individuais localizadas no canal comum de alimentação de cada bateria. Já a saída é feita por meio de uma caixa receptora, com dois compartimentos, os quais recebem os efluentes de um par de filtros. Em cada compartimento foi previsto um sifão parcializador e um vertedor para controle do nível de água na saída do referido sifão.

Este sistema de entrada e saída das unidades de filtração foi idealizado para garantir que o filtro operasse com taxa de filtração e nível constantes, entretanto, de acordo com informações disponibilizadas por colaboradores na Caesb, os sifões parcializadores encontram-se desativados devido à problemas nas válvulas de controle de entrada de ar. Tal problema no sistema de saída de água dos filtros dificulta a manutenção do modo de

operação desejado, e como consequência tem sido observado a presença de pressões negativas no interior do meio filtrante e a conseguinte redução da duração da carreira de filtração na estação.

Cada filtro possui profundidade total de 3,0 m e área em planta de 35,75 m<sup>2</sup>, resultando em taxa de filtração nominal de 282 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia quando todos os filtros estão em operação e 294 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia quando uma unidade é retirada para lavagem ou manutenção.

O meio filtrante é de camada dupla com espessura total de 0,8 m, constituída de antracito e areia, e o fundo do filtro é composto por blocos Leopold e camada suporte com espessuras de 0,1 e 0,3 m, respectivamente. Como a profundidade do filtro é de 3,0 m, a carga hidráulica disponível para a filtração é cerca de 1,8 m. As características granulométricas das camadas filtrantes são mostradas na Tabela 3.2.

Nos últimos anos, também segundo informações disponibilizadas por colaboradores na Caesb, a ETA Brasília tem enfrentado problemas operacionais ligados à perda de material filtrante, principalmente antracito, durante a lavagem dos filtros. O meio filtrante atual já não mais possui a espessura e a granulometria definidas no projeto de ciclo completo com flotação com ar dissolvido, uma vez que este foi substituído pelo meio filtrante utilizado na configuração anterior da estação, o tratamento por filtração direta.

Tabela 3.2 – Características granulométricas do meio filtrante da ETA Brasília (Caesb, 2011).

<b>Parâmetro</b>	<b>Areia</b>	<b>Antracito</b>
<b>Tamanho efetivo (mm)</b>	0,5 a 0,6	0,95 a 1,05
<b>Coefficiente de Uniformidade</b>	1,5	1,5
<b>Espessura da camada (m)</b>	0,3	0,5

Além disso, em 2017, devido à crise hídrica ocorrida no Distrito Federal, a ETA Brasília passou a utilizar também o córrego Bananal como manancial, com outorga para captação de até 726 L/s, a fim de reforçar o sistema Torto/Santa Maria. Ressalta-se que, o córrego Bananal apresenta turbidez mineral elevada, fato que pode comprometer a flotação e, por conseguinte, a filtração, reduzindo a duração da carreira de filtração e qualidade da água produzida.

Desta forma, a falta de controle operacional, a perda de material do meio filtrante e a alteração das características da água afluyente à estação, após a mistura da água dos três mananciais, comprometem a eficiência da filtração e evidenciam a necessidade de intervenção na forma de operação da ETA.

Neste Contexto, a Caesb encomendou um estudo de consultoria denominado “Projeto executivo das adequações emergenciais necessárias para a melhoria da performance da Estação de Tratamento de Água do Plano Piloto” realizado em 2017 e 2018, com vistas à melhorar a eficiência da estação.

No projeto, com relação à filtração, foram sugeridas a alteração do modo de operação dos filtros da ETA Brasília para operar com taxa de filtração declinante e nível variável assim como a mudança das características do meio filtrante, retornando para uma condição similar a anterior (Tabela 3.2), definida na reforma de 2009. Além disso, ainda foi proposto a substituição da camada suporte de 0,3 m por uma placa especial para suporte com espessura de poucos centímetros. Entretanto, não foram realizados estudos experimentais de filtração para definição das medidas indicadas no referido relatório.

### **3.2 FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE POR GRAVIDADE**

A filtração pode ser entendida como o processo de remoção parcial de partículas suspensas e coloidais e de micro-organismos presentes na água que escoam através de um meio poroso, geralmente areia e/ou antracito (Di Bernardo, 1993).

Desta forma, o objetivo básico da filtração consiste na separação das partículas e micro-organismos indesejáveis, que não foram retidos nas etapas anteriores de coagulação, floculação e sedimentação ou flotação (Arboleda, 2000). Como geralmente a filtração é a última etapa do processo de remoção de impurezas (partículas, bactérias e protozoários) nas ETAs, o desempenho desta unidade é essencial para garantir a produção de água que atenda ao padrão de potabilidade e as demais normativas vigentes, além de permitir ainda que a desinfecção ocorra de forma adequada.

De modo geral, a filtração pode ser classificada de acordo com: **a) taxa de aplicação:** também denominada de velocidade ou taxa de filtração e dada pela razão entre a vazão



afluente e a área em planta do filtro, podendo ser rápida ou lenta; **b) sentido de escoamento do fluido:** ascendente ou descendente; e **c) tipo de arranjo hidráulico:** por pressão ou por gravidade.

O processo de filtração rápida descendente por gravidade consiste na passagem de um fluido no sentido descendente através de um meio filtrante granular com superfície livre, ou seja, aberto à atmosfera, no qual o escoamento ocorre devido à força gravitacional e com taxa de aplicação elevada (Brink, 2009).

A filtração rápida diferencia-se da lenta pelo tipo de mecanismo dominante e pela taxa de aplicação empregada. A primeira é caracterizada pela predominância dos mecanismos físico-químicos e pela maior taxa de aplicação com relação a segunda, que apresenta prevalência dos mecanismos biológicos de remoção de impurezas (Santos, 2004). A Tabela 3.3 apresenta as taxas de filtração características das filtrações rápida e lenta.

Além disso, a filtração pode ainda ser subclassificada em função da profundidade de penetração das impurezas, sendo: com ação superficial, quando a remoção de partículas ocorre de forma mais significativa somente no topo do camada filtrante, ocasionando carreiras de filtração curtas; ou com ação de profundidade, quando as impurezas são retidas ao longo de todo meio filtrante, devido à sucessão de estágios relativos à colmatação das subcamadas inferiores que compõem o meio granular (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Tabela 3.3 – Taxas de filtração características das filtrações rápida e lenta.

Referência	Filtração rápida ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	Filtração lenta ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )
Arboleda (2000)	120 a 360	7 a 14
Di Bernardo <i>et al.</i> (1999)	150 a 600	< 6
Di Bernardo e Sabogal Paz (2008)	120 a 600	2 a 6
NBR 12216 (1992) *	120 a 360	< 6
Santos (2004)	150 a 360	< 6

\* Na ausência de experimentos em escala piloto para determinação da taxa de filtração.

Na filtração rápida, recomenda-se que ocorra preferivelmente a filtração com ação de profundidade, já que possibilita maior retenção de partículas sem que ocorra a rápida obstrução dos vazios do meio filtrante, evitando-se assim carreiras de filtração curtas e com

baixa produtividade das unidades de filtração (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

A remoção de partículas presentes na suspensão ocorre devido à ação de diversos mecanismos, que são complexos e influenciados principalmente por: características físicas e químicas da suspensão, da água e do meio filtrante; taxa de filtração; e método de operação do filtro (Amirtharajah, 1998; Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Neste sentido, a filtração não pode ser considerada como apenas a ação física de coar/peneirar, pela exclusão de tamanho, mas sim como o resultado da combinação de três mecanismos distintos (Figura 3.3), são eles: transporte, aderência e desprendimento.

Os mecanismos de transporte são aqueles responsáveis pela aproximação das partículas em suspensão à superfície dos grãos do meio filtrante, também denominados de grãos coletores, podendo permanecer aderidas a tais superfícies devido às forças superficiais, quando estas resistem às forças de cisalhamento geradas pelas características do fluxo e proporcionais à velocidade de aproximação ( $V_{\infty}$ ) do fluido entre os interstícios do meio granular (Di Bernardo e Dantas, 2005).

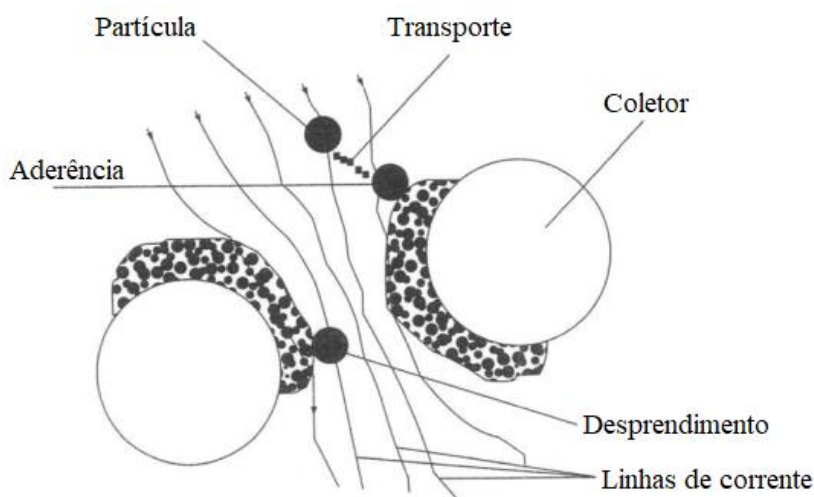


Figura 3.3 – Representação dos mecanismos de transporte, aderência e desprendimento (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Os principais fatores que influenciam nos mecanismos de transporte (impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica) são a velocidade de filtração, a granulometria do meio filtrante e o tamanho e a densidade das partículas a serem removidas presentes na água.

Do ponto de vista operacional, a eficiência dos mecanismos de transporte pode ser otimizada de forma mais simples a partir da escolha adequada da granulometria do meio filtrante e do controle da velocidade de filtração, já que as características das impurezas presentes na água podem variar durante o processo de tratamento. Ressalta-se ainda que tais características podem ser modificadas e adequadas nos processos anteriores de coagulação e floculação, dependendo da tecnologia de tratamento utilizada.

Diversos autores apontam que os mecanismos de interceptação, sedimentação e difusão são os principais responsáveis pela eficiência da filtração, em função das características das partículas geralmente encontradas na água bruta.

Já o mecanismo de aderência é responsável por capturar as partículas e fazer com que sejam aderidas na superfície dos grãos coletores ou nas partículas previamente aderidas. Este mecanismo depende principalmente das propriedades de superfície das partículas e do grão coletor e ocorre devido à interação superficial de origem química e a interação combinada entre as forças eletrostáticas e as forças de van der Waals.

Quando, em função do aumento da velocidade intersticial no meio granular ocasionado pelo aumento da taxa de filtração ou pela redução dos vazios devido à aderência de partículas, as forças de cisalhamento superam as forças de aderência ocorre o fenômeno de desprendimento. De acordo com Amirtharajah (1988), os fenômenos de adesão e desprendimento ocorrem simultaneamente durante todo o processo de filtração. Caso a velocidade intersticial continue a aumentar, causando o arraste de partículas para as camadas seguintes até aparecerem na água filtrada, ocorre o transpasse.

A retenção de partículas no meio filtrante e a consequente redução de volume de vazios no mesmo resulta no aumento da perda de carga. A perda de carga e o transpasse, representado pelo contínuo aumento da turbidez na água filtrada, são os principais parâmetros que indicam o momento em que o filtro deve ser retirado de operação para lavagem, a fim de se evitar o comprometimento da qualidade da água filtrada (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Desta forma, e ainda com objetivo de evitar o comprometimento da qualidade da água filtrada, o transpasse pode ser reduzido a partir da escolha adequada do meio filtrante, uma vez que a eficiência da filtração é influenciada pelas características do meio granular,

principalmente pelo tamanho e pelas características de superfícies dos grãos. Na Tabela 3.4 Howe *et al.* (2012) apresentam as propriedades típicas das camadas filtrantes de filtros rápidos utilizados no tratamento para abastecimento humano.

Tabela 3.4 – Propriedades típicas do meio filtrante em filtros rápidos (Howe *et al.* 2012, modificado).

<b>Propriedades</b>	<b>Granada</b>	<b>Areia</b>	<b>Antracito</b>
<b>Tamanho efetivo (mm)</b>	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 2,0
<b>Coefficiente de uniformidade - CU</b>	1,3 a 1,7	1,3 a 1,7	1,3 a 1,7
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	3.600 a 4.200	2.650	1.400 a 1.800
<b>Porosidade (%)</b>	45 a 58	40 a 43	47 a 52
<b>Dureza (Mohs)</b>	6,5 a 7,5	7	2 a 3

Com o intuito de otimizar o processo de filtração, foram propostos diversos tipos de filtros rápidos. De acordo com Gabriel (2000), as características dos filtros rápidos podem diferir em diversos aspectos, entre eles: espessura do meio filtrante, tipo de material empregado, granulometria do meio, número de camadas granulométricas, forma de lavagem, sentido de escoamento da água e o modo de operação. Dentre estes aspectos, destaca-se neste trabalho o modo de operação das unidades de filtração.

### 3.3 MODOS DE OPERAÇÃO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE

Segundo Gabriel (2000), o modo de operação de filtros é a maneira pela qual se determina o comportamento da taxa de filtração e do nível de água no interior dos filtros. O controle da forma de operação de filtros é extremamente importante, uma vez que as taxas de filtração e a resistência ao escoamento variam ao longo do tempo nas ETAs.

#### 3.3.1 Hidráulica da Filtração

A perda de carga total durante a filtração é composta por dois termos, as perdas de carga laminar e turbulenta. A perda de carga laminar total corresponde ao somatório das perdas de carga decorrentes da própria resistência ao escoamento (perdas de carga iniciais no meio filtrante limpo e na camada suporte) e da perda de carga devido à retenção de impurezas. Já a perda de carga total turbulenta é dada pelo conjunto das perdas de carga nas tubulações de

entrada e saída, nos dispositivos, no sistema de drenagem, entre outros (Di Bernardo, 1993).

Segundo Arboleda (1974, *apud* Gabriel, 2000) e Di Bernardo (1993), as perdas de carga laminar e turbulenta devem ser iguais a carga hidráulica disponível para que se obtenha a taxa de filtração desejada, estabelecendo a seguinte relação:

$$\text{Taxa de filtração} \propto \frac{\text{Carga hidráulica disponível}}{\text{Resistência total do filtro}}$$

A partir da combinação dos três parâmetros expressos na relação acima há quatro formas distintas de operação de filtros rápidos (Tabela 3.5).

De forma prática, os modos de operação de filtros têm sido divididos em dois grupos, os de taxa de filtração constante e os de taxa de filtração variável/declinante.

Tabela 3.5 – Descrição das características gerais dos métodos de operação de filtros (Arboleda 1974, *apud* Gabriel, 2000).

<b>Carga hidráulica disponível (H)</b>	<b>Resistencia total (K)</b>	<b>Taxa de Filtração (T)</b>	<b>Método de operação</b>
<b>Constante</b>	Constante	Constante	Taxa constante com controlador
<b>Variável</b>	Constante	Constante	Taxa constante com controlador
<b>Constante</b>	Variável	Variável	Taxa declinante verdadeira
<b>Variável</b>	Variável	Constante Variável	Taxa declinante variável

### 3.3.2 Filtração com Taxa Constante

A filtração com taxa constante pode ser de nível constante ou variável. Entende-se por nível, a carga hidráulica disponível.

Na filtração com taxa e nível constantes por gravidade, o nível de água praticamente não varia no interior de cada filtro. Como a resistência ao escoamento tende a aumentar devido à retenção de partículas no meio filtrante, para que tal resistência e, por conseguinte, o nível

de água sejam mantidos constantes, há a necessidade de utilização de dispositivos controladores.

Tais dispositivos devem gerar um valor de perda de carga igual a diferença entre a carga hidráulica disponível e a soma das perdas de carga no meio filtrante limpo, na camada suporte e nas tubulações, acessórios e sistema de drenagem (Di Bernardo, 1993). À medida que a perda de carga decorrente da retenção de impurezas aumenta, a perda de carga gerada pelo dispositivo deve diminuir até que se atinja o valor mínimo, a partir do qual o dispositivo não é mais capaz de compensar as variações de perdas de carga no meio filtrante e o filtro deve então ser retirado de operação para lavagem.

Os dispositivos controladores utilizados geralmente são controladores de vazão como, por exemplo, comportas e válvulas que possibilitam que a vazão seja corrigida quando o valor medido for diferente do valor previamente definido e também os sensores de nível, que se conectam com os controladores de vazão, realizando as alterações necessárias nestes dois parâmetros (vazão e carga hidráulica) para que a taxa de filtração resulte constate.

Na filtração com taxa constante e nível variável por gravidade, a perda de carga decorrente da colmatação do meio filtrante é compensada pela elevação do nível de água sobre o meio filtrante. Costa (2001) e Di Bernardo (1993) fazem duas recomendações principais sobre os filtros de taxa constante e nível variável. A primeira é sobre a entrada de água, que deve ser realizada por vertedores ou comportas individuais com descarga livre que distribuam uniformemente a vazão entre os filtros a fim de possibilitar que o nível de água no interior de cada um deles varie independentemente dos demais. Já a segunda recomendação é um alerta sobre a necessidade de instalação de um dispositivo na saída do filtro (caixa com saída através de vertedor com crista posicionada acima do meio filtrante ou válvula) para evitar que o nível de água se situe abaixo da superfície do meio filtrante no início da operação do filtro, quando a taxa de aplicação é máxima.

De acordo com Di Bernardo e Sabogal Paz (2008), em filtros com dispositivos controladores de jusante, ou seja, de nível constante, quando a perda de carga em um determinado ponto for superior à carga hidráulica disponível haverá a ocorrência de pressões relativas negativas no interior do meio filtrante, resultando na formação de bolhas de ar que reduzem a seção de escoamento e diminuem a duração da carreira de filtração. Na Figura 3.4 é mostrado o

diagrama de pressão em um filtro de taxa e nível constantes, no qual é possível a visualização da região de ocorrência de pressões negativas no interior do meio filtrante (área hachurada).

Na Figura 3.4, o ponto A representa um piezômetro localizado a uma distância X abaixo do topo do meio filtrante. O nível de água acima do topo do meio filtrante é  $H_A$  e o nível de água observado no piezômetro A é  $H_t$ . Desta forma, a diferença entre o nível de água no interior do meio filtrante e o nível de água observado no piezômetro em A representa a perda de carga até o ponto A, sendo a pressão neste ponto dada por  $P_A = H_A - (H_t - X)$ . Logo, sempre que a perda de carga no meio filtrante em um ponto for maior que a carga hidráulica disponível ocorrerá pressão negativa.

Como as pressões negativas tendem a surgir após um dado tempo de operação, após o desenvolvimento da perda de carga no meio filtrante, este problema pode, em função da redução da seção de escoamento, intensificar a velocidade intersticial e as forças de cisalhamento, que já são elevadas no final da carreira de filtração de filtros de taxa constante devido à colmatação do meio filtrante, piorando a qualidade da água tratada.

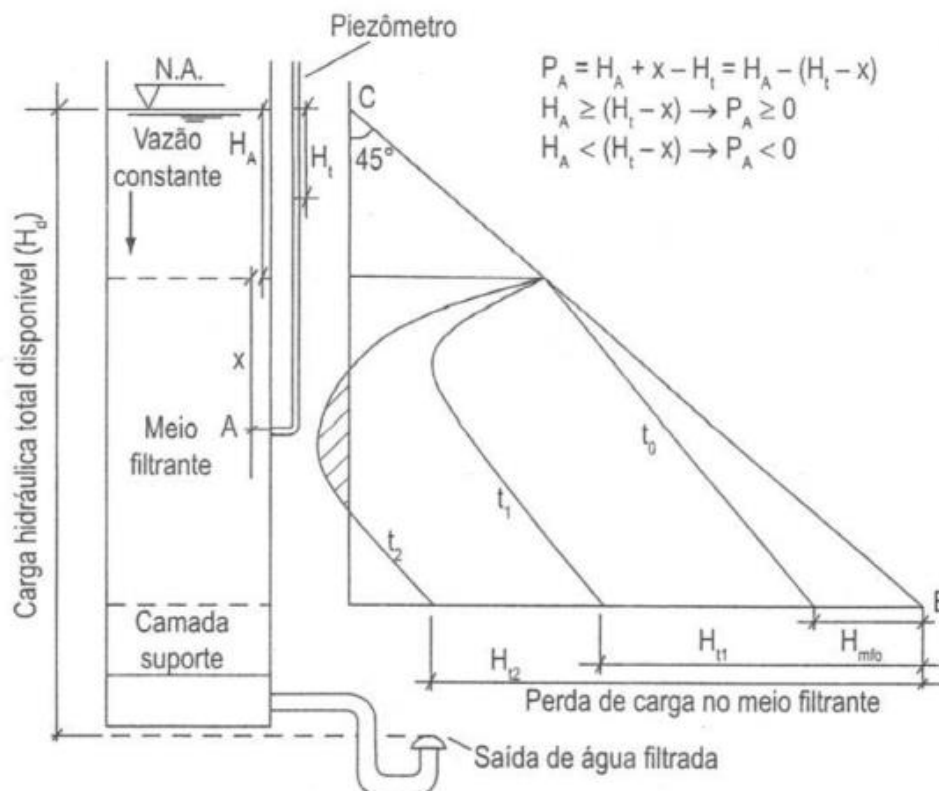


Figura 3.4 – Diagrama de pressão em um filtro de taxa e nível constantes (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Ressalta-se ainda que em função da utilização de diversos dispositivos de controle, geralmente de nível e vazão, a filtração com taxa constante pode apresentar problemas caso não haja manutenção contínua, já que tais dispositivos podem apresentar desgastes devido à passagem do tempo, ou caso a operação do sistema não seja adequada (Gabriel, 2000). Neste sentido, a filtração com taxa declinante apresenta a vantagem de não necessitar destes dispositivos controladores (Eyvaz *et al.*, 2013).

### **3.3.3 Filtração com Taxa Declinante**

A filtração com taxa declinante consiste no modo de operação no qual a taxa de filtração varia de um valor máximo, quando o meio filtrante se encontra limpo, até o valor mínimo quando este deve ser lavado e pode ainda ser de nível constante (com significativo armazenamento de água a montante dos filtros) ou variável (sem armazenamento de água).

Como na filtração com taxa declinante e nível constante a carga hidráulica disponível é mantida constante e ao ocorrer o aumento da resistência ao escoamento ao longo da carreira de filtração, a velocidade intersticial diminui, resultando na redução da perda de carga turbulenta. Desta forma, este modo de operação caracteriza-se pela redução exponencial da taxa de filtração (Di Bernardo, 1993).

A diminuição da velocidade intersticial, em especial no final da carreira de filtração, resulta também na redução do transpasse, produzindo então água de melhor qualidade. Entretanto, apesar desta tecnologia produzir água de melhor qualidade com relação a filtração de taxa de filtração constante ela não é comumente aplicada, pois necessita de reservação de água a montante ou a jusante dos filtros, dependendo da capacidade de filtração da estação.

Já a filtração com taxa e nível variáveis, depende das condições de entrada e saída do filtro. Este último modo de operação consiste no objeto de estudo do presente trabalho e, por isso, será melhor discutido ao longo deste capítulo.

Segundo Gabriel (2000), o método de operação com taxa declinante e nível variável é caracterizado pelo sistema de entrada e saída que funciona como vaso comunicante, de forma que a perda de carga seja pequena nas entradas de cada filtro para que o nível seja praticamente o mesmo em todos os filtros, sendo estes lavados um por vez em intervalos de



tempo significativos.

Di Bernardo e Sabogal Paz (2008) recomendam que a entrada de água nos filtros de taxa declinante deve ser realizada por meio de uma comporta afogada, de modo que os filtros funcionem como vasos comunicantes, com alimentação dos filtros feita através de tubulação ou canal com dimensões relativamente grandes para não restringir o escoamento, já que o número de filtros e a sequência da lavagem podem alterar a vazão em determinados trechos, resultando em cargas hidráulicas diferentes nos filtros da bateria. Na Figura 3.5 é mostrado um arranjo típico de um filtro de taxa declinante variável.

Já a Figura 3.6 apresenta os níveis de água no canal comum de alimentação dos filtros (CCAF) para a situação repetitiva em uma bateria com quatros filtros. A situação repetitiva é a condição na qual a taxa de filtração em qualquer filtro da bateria permanece aproximadamente constante entre lavagens sucessivas e decresce na forma de degrau após um filtro recém-lavado ser colocado em funcionamento e quando a soma das vazões de saída se igualar à vazão afluyente a ETA.

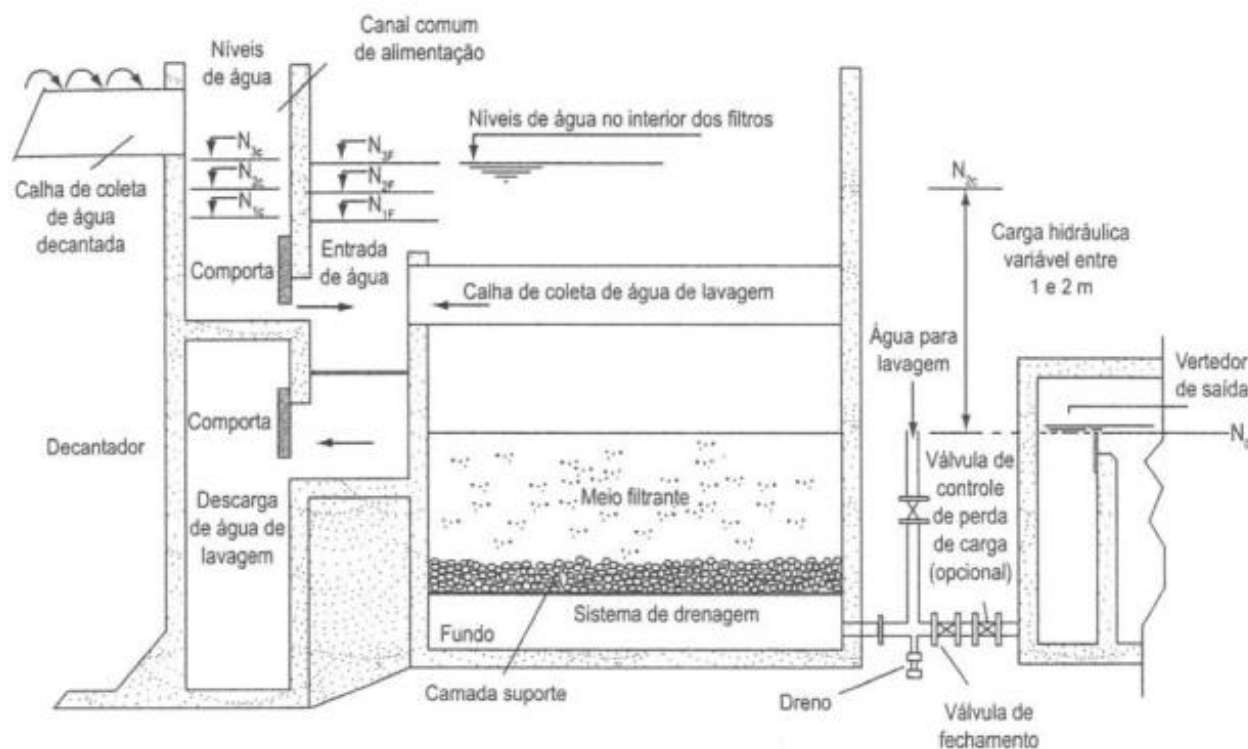


Figura 3.5 – Arranjo típico de um filtro de taxa declinante variável (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

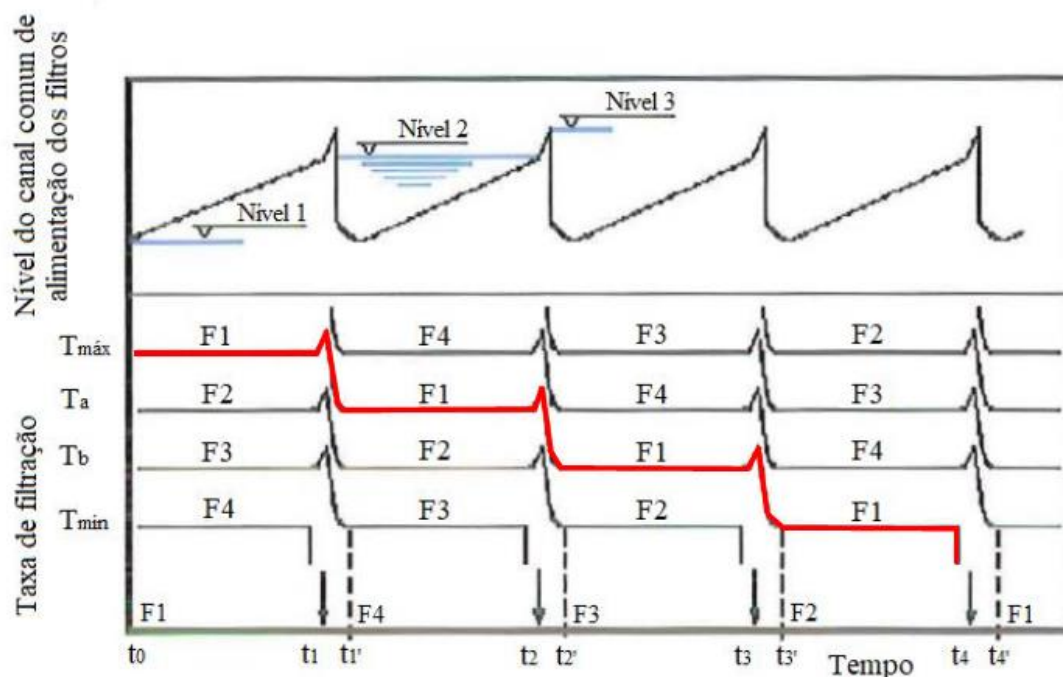


Figura 3.6 – Configuração típica de um sistema com taxa declinante variável constituído de quatro filtros em situação repetitiva (Di Bernardo, 1993).

De acordo com Di Bernardo (1993), para uma bateria de filtros idênticos são três os principais níveis que ocorrem no canal comum de alimentação dos filtros, conforme mostrado nas Figuras 3.5 e 3.6, são eles: **a) nível 1 ( $N_{1c}$ )**: equivale ao nível de água mínimo dinâmico no CCAF, que ocorre imediatamente após a reintrodução de um filtro recém-lavado na bateria, quando o somatório das vazões de saída se iguala à vazão afluyente a ETA; **b) nível 2 ( $N_{2c}$ )**: representa o nível de água no CCAF para o qual o filtro mais sujo da bateria deve ser retirado para lavagem; e **c) nível 3 ( $N_{3c}$ )**: corresponde ao nível de água no CCAF no final da lavagem de um filtro qualquer da bateria, imediatamente antes do filtro recém-lavado ser colocado em funcionamento e quando o conjunto das vazões de saída se iguala à vazão afluyente a ETA.

Nota-se na Figura 3.6 que cada filtro da bateria opera com uma taxa de filtração determinada pelo seu grau de colmatção e que as taxas de filtração se mantêm praticamente constantes entre as lavagens dos filtros, já que o aumento da resistência no meio filtrante é compensado pela elevação do nível de água de  $N_{1c}$  para  $N_{2c}$  no CCAF. Em  $t_1$  o filtro F4 é retirado de operação para lavagem, por apresentar taxa de filtração mínima  $T_{\min}$  e em  $t_1'$  o filtro F4 já está em operação e em situação repetitiva.

No momento em que o nível  $N_{2c}$  é atingido, o filtro mais sujo e que opera com menor taxa de filtração deve ser retirado para lavagem. Após o fim da lavagem e imediatamente antes do filtro recém-lavado ser colocado em funcionamento será atingido o nível  $N_{3c}$  no CCAF, devido à redistribuição da vazão do filtro retirado para os remanescentes, ocasionando o leve aumento da taxa de filtração. Em seguida, quando o filtro recém-lavado e com maior taxa de filtração começa a operar o nível de água no CCAF diminui até atingir o nível  $N_{1c}$ , repetindo-se assim o ciclo.

Gráfico de Nível de água vs Tempo. O eixo vertical é rotulado "Nível de água" e o eixo horizontal é rotulado "Tempo". A curva mostra quatro níveis de inundação: Nível 1 (o mais baixo), Nível 2, Nível 3 e Nível 4 (o mais alto). As setas indicam a ordem crescente dos níveis.

Segundo Akgiray e Saatçi (1998), o nível 4 ocorre imediatamente após a introdução de um filtro recém-lavado na bateria e caracteriza-se pela queda acentuada do nível de água no CCAF devido à redistribuição da água acumulada para o novo filtro. Em seguida, o nível de água continua a decrescer de forma mais lenta até o nível  $N_{lc}$  em função da maior taxa de filtração no filtro recém-lavado, comportamento similar ao descrito por Di Bernardo (1986).

Desta forma, Cleasby (1969 1972; *apud* Di Bernardo e Dantas, 20005) destaca as seguintes vantagens do método de operação com taxa declinante sobre o de taxa constante:

- Após a interrupção da operação de um filtro para lavagem, o nível de água no CCAF sobe gradativamente nos demais, assim como as variações nas taxas de filtração;
- A perda de carga é visível através da observação do nível de água CCAF;
- A redução da taxa de filtração ao longo da carreira de filtração resulta em melhor qualidade da água filtrada, já que não ocorre o transpasse;
- A carga hidráulica necessária para a filtração é menor para se obter carreira de filtração com a mesma duração, que resulta no maior volume de água produzido por unidade de perda de carga. Segundo Gabriel (2000) isto ocorre em decorrência da perda de carga turbulenta que decresce à medida em que a taxa de filtração diminui ao longo da carreira de filtração.

Apesar de dados experimentais evidenciarem o melhor desempenho dos filtros de taxa declinante variável, os primeiros modelos matemáticos encontrados na literatura para a determinação das taxas de filtração e da variação de nível nos filtros baseavam-se em equações que utilizam coeficientes experimentais, fato que dificultou a aplicação prática deste modo operação (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

### **3.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE**

A seguir serão apresentados os modelos matemáticos de Bi Bernardo (1986) e de Machado e Di Bernardo (1995), que são modelos mais simples e com bons resultados de previsão das taxas de filtração e dos níveis de água em baterias de filtros com taxa declinante variável.

#### **3.4.1 Modelo de Bi Bernardo (1986)**

A partir do equacionamento proposto por Di Bernardo (1986) é possível verificar os efeitos da taxa média de filtração, da variação do número de filtros, da carga hidráulica e da perda de carga turbulenta no desempenho de baterias de filtros com taxa declinante variável, sem a necessidade de utilização de equações empíricas, já que este modelo não faz uso de nenhuma equação que representa a variação do coeficiente de permeabilidade devido à

retenção de impurezas no meio filtrante ao longo do tempo.

Este modelo permite a determinação das taxas de filtração e das variações de nível de água nos filtros, durante a operação e a lavagem, porém não prevê o comportamento da bateria ao longo do tempo.

Para a modelagem, o autor considera uma bateria de quatro filtros, que inicialmente se encontram limpos e, portanto, operando com a taxa média de filtração. O nível de água no CCAF inicia-se no nível  $N_{0c}$ , que corresponde à cota da crista do vertedor de saída somada às perdas nos filtros, razão pela qual há a necessidade de se começar a lavar os filtros em intervalas de tempo pré-determinados, a fim de que todos os filtros sejam lavados uma vez no período de 24 horas (Bernardo e Dantas, 2005). Após todos os filtros terem sido lavados, o próximo filtro só será lavado quando o nível  $N_{2c}$  for atingido, e assim por diante, resultando em situação repetitiva, na qual os filtros têm suas taxas diminuídas em forma de degraus, sempre que um filtro-recém lavado é colocado em operação, caso os filtros sejam idênticos e a qualidade da água bruta e a vazão permaneçam inalteradas, conforme é ilustrado na Figura 3.6.

A principal hipótese que possibilitou o desenvolvimento deste modelo foi a de que durante o período de transição entre a retirada de um filtro para lavagem e após o filtro recém-lavado ter sido colocado em funcionamento os coeficientes de resistividade permanecem constantes nos filtros em operação, ou seja, não há alteração do grau de colmatação no meio filtrante nesse período. Tal hipótese permitiu a determinação das perdas de carga laminar e turbulenta, com relação à cota da crista do vertedor de saída, ao longo da carreira de filtração, representadas pela Equação 3.1 (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

$$H = K_{r0}T + K_tT^y \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

H: perda de carga (m);

$K_{r0}$ : coeficiente de perda de carga laminar inicial (d);

$K_t$ : coeficiente de perda de carga turbulenta ( $d^y$ );

T: taxa de filtração (m/d);

y: expoente.

Considerou-se também que o escoamento através do meio filtrante é laminar, independente do estado de colmatação no meio granular, podendo então a perda de carga devido à retenção de partículas ser expressa como função linear da taxa de filtração, conforme a seguinte equação:

$$H_r = K_r T \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

$H_r$ : perda de carga devido à retenção de impurezas (m);

$K_r$ : coeficiente resistividade devido à retenção de impurezas (d);

$T$ : taxa de filtração (m/d).

A soma das perdas de carga turbulenta ( $H_{tu}$ ) e laminar ( $H_L$ ), bem como os níveis de água no CCAF ( $N_{1c}$ ,  $N_{2c}$  e  $N_{3c}$ ) em função da taxa de filtração dos quatro filtros da bateria ( $T_{máx}$ ,  $T_a$ ,  $T_b$  e  $T_{mín}$ ) considerados no modelo de Di Bernardo (1986) são mostrados na Figura 3.8.

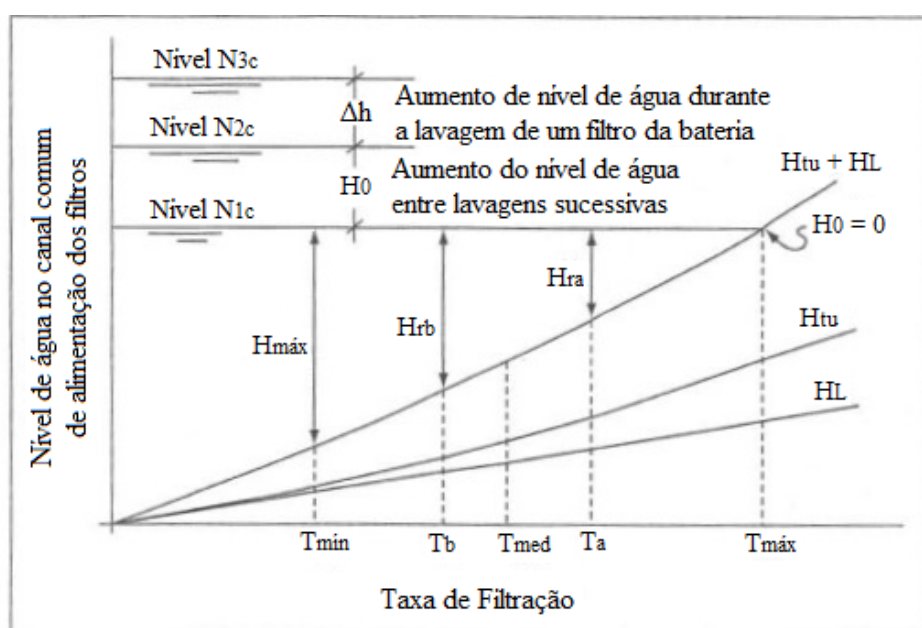


Figura 3.8 – Variação do nível de água no CCAF em função da taxa de filtração e das perdas de carga turbulenta e laminar ( Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Os parâmetros carga hidráulica  $H_0$ ,  $H_{ra}$ ,  $H_{rb}$ ,  $H_{máx}$  apresentados na Figura 3.8 podem ser descritos como função da respectiva taxa de filtração, por meio de uma equação similar a Equação 3.2, em função dos diferentes níveis de colmatação  $K$ , que são inversamente proporcionais ao coeficiente de permeabilidade (Costa, 2001).

Na Tabela 3.6 é mostrado o desenvolvimento da modelagem matemática, que permite a determinação das taxas de filtração e dos níveis de água para cada filtro da bateria.

Tabela 3.6 – Taxas de filtração, perdas de carga, coeficiente de resistividade e equações básica do modelo de Bi Bernardo (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Nível	Filtro	Condição	T	Kr	Hr	Equações para o filtro F1
N1c	F1	Início	$T_{m\acute{a}x}$	zero	zero	$H_0 = 0$
	F2		$T_a$	$K_{r0}$	$H_{ra}$	
	F3		$T_b$	$K_{ra}$	$H_{rb}$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{rb}$	$H_{m\acute{a}x}$	
N2c	F1	antes da lavagem de F4	$T_{m\acute{a}x}$	$K_{r0}$	$H_0$	$H_0 = K_{r0} T_{m\acute{a}x}$
	F2		$T_a$	$K_{ra}$	$H_{ra} + H_0$	
	F3		$T_b$	$K_{rb}$	$H_{rb} + H_0$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{m\acute{a}x}$	$H_{m\acute{a}x} + H_0$	
N1c	F1	após F4 entrar em operação	$T_{m\acute{a}x}$	zero	zero	$\frac{H_0}{T_{m\acute{a}x}} = \frac{H_{ra}}{T_a}$ $\rightarrow H_{ra} = H_0 \frac{T_a}{T_{m\acute{a}x}}$
	F2		$T_a$	$K_{r0}$	$H_{ra}$	
	F3		$T_b$	$K_{ra}$	$H_{rb}$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{rb}$	$H_{m\acute{a}x}$	
N2c	F1	antes da lavagem de F3	$T_{m\acute{a}x}$	$K_{r0}$	$H_0$	$H_{ra} + H_0 = K_{ra} T_a$
	F2		$T_a$	$K_{ra}$	$H_{ra} + H_0$	
	F3		$T_b$	$K_{rb}$	$H_{rb} + H_0$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{m\acute{a}x}$	$H_{m\acute{a}x} + H_0$	
N1c	F1	após F3 entrar em operação	$T_{m\acute{a}x}$	zero	zero	$H_{rb} = K_{ra} T_b$ $\frac{H_{ra} + H_0}{T_a} = \frac{H_{rb}}{T_b}$ $\rightarrow H_{rb} = (H_{ra} + H_0) \frac{T_b}{T_a}$
	F2		$T_a$	$K_{r0}$	$H_{ra}$	
	F3		$T_b$	$K_{ra}$	$H_{rb}$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{rb}$	$H_{m\acute{a}x}$	
N2c	F1	antes da lavagem de F2	$T_{m\acute{a}x}$	$K_{r0}$	$H_0$	$H_{rb} + H_0 = K_{rb} T_b$
	F2		$T_a$	$K_{ra}$	$H_{ra} + H_0$	
	F3		$T_b$	$K_{rb}$	$H_{rb} + H_0$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{m\acute{a}x}$	$H_{m\acute{a}x} + H_0$	
N1c	F1	após F2 entrar em operação	$T_{m\acute{a}x}$	zero	zero	$H_{m\acute{a}x} = K_{rb} T_{m\acute{i}n}$ $\frac{H_{rb} + H_0}{T_b} = \frac{H_{rm\acute{a}x}}{T_{m\acute{i}n}}$ $\rightarrow H_{rm\acute{a}x} = (H_{rb} + H_{r0}) \frac{T_{m\acute{i}n}}{T_b}$
	F2		$T_a$	$K_{r0}$	$H_{ra}$	
	F3		$T_b$	$K_{ra}$	$H_{rb}$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{rb}$	$H_{m\acute{a}x}$	
N2c	F1	antes da lavagem de F1	$T_{m\acute{a}x}$	$K_{r0}$	$H_0$	$H_{m\acute{a}x} + H_0 = K_{rm\acute{a}x} T_{m\acute{i}n}$
	F2		$T_a$	$K_{ra}$	$H_{ra} + H_0$	
	F3		$T_b$	$K_{rb}$	$H_{rb} + H_0$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{m\acute{a}x}$	$H_{m\acute{a}x} + H_0$	
N1c	F1	após F1 entrar em operação	$T_{m\acute{a}x}$	zero	zero	$H_0 = K_{r0} T_{m\acute{a}x}$
	F2		$T_a$	$K_{r0}$	$H_{ra}$	
	F3		$T_b$	$K_{ra}$	$H_{rb}$	
	F4		$T_{m\acute{i}n}$	$K_{rb}$	$H_{m\acute{a}x}$	

Para a situação na qual o nível  $N_{2c}$  é conhecido, ou seja, a carga hidráulica na qual o filtro mais sujo é retirado de operação para lavagem, é possível iniciar o cálculo para determinação das taxas de filtração e as perdas de carga envolvidas, conforme as seguintes etapas:

- 1) Fixa-se o nível  $N_{2c}$ , de forma que a relação entre as taxas máxima e média de filtração esteja compreendida entre 1,3 a 1,5.
- 2) Iguala-se a perda de carga total (Equação 3.1) à carga hidráulica disponível, substituindo  $T$  por  $T_0$  e  $H$  por  $H_d$  no nível  $N_{2c}$ , ou seja:

$$H_d = K_{r0}T_0 + K_t(T_0)^y \quad \text{Equação 3.3}$$

A Equação 3.3 resulta em um valor da taxa de filtração  $T_0$  no nível  $N_{2c}$ , sem a retenção de impurezas. Porém, após o filtro recém-lavado ser colocado em operação o nível no CCAF não é  $N_{2c}$ , já que a resistência total ao escoamento diminui. Então, para efeito de cálculo, considera-se que a  $T_{máx}$  seja igual a  $(0,8 \text{ a } 0,85) \times T_0$  (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008), obtendo-se o valor de  $H_0$  usando a Equação 3.4.

$$H_d - H_0 = K_{r0}T_{máx} + K_t(T_{máx})^y \quad \text{Equação 3.4}$$

- 3) Calcula-se os valores de  $T_a$  e  $H_{ra}$  no nível  $N_{1c}$ , por meio do sistema que envolve as Equações 3.5 e 3.6.

$$H_{ra} = H_0 \frac{T_a}{T_{máx}} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$H_d - H_0 - H_{ra} = K_{r0}T_a + K_t(T_a)^y \quad \text{Equação 3.6}$$

- 4) Utilizam-se, de forma semelhante, as demais equações da Tabela 3.4 para determinar os pares de valores  $T_b$  e  $H_{rb}$ ,  $T_{mín}$  e  $H_{rmáx}$ .
- 5) Obter-se a taxa média  $T_{med}$ , dada pela razão entre a soma  $T_{máx} + T_a + T_b + T_{mín}$  e o número de filtros, a fim de se comparar com o valor da taxa média real. Caso os valores da taxa média calculada e real não resultem iguais, deve-se refazer o cálculo com a alteração de  $T_{máx}$ , em um processo iterativo.

Para a determinação do nível  $N_{3c}$  e das taxas de filtração nos filtros remanescentes em operação, após a lavagem de um outro filtro, as mesmas etapas podem ser seguidas,



utilizando o equacionamento apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Nível  $N_{3c}$  e as taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles do modelo de Di Bernardo (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Nível	Condição	Equações
$N_{1c}$	antes de F4 ser retirado de operação para lavagem	$K_t (T_{m\acute{a}x})^y + (K_{ro} + K_0) T_{m\acute{a}x} = H_d$
		$K_t (T_a)^y + (K_{ra} + K_0) T_a = H_d$
		$K_t (T_b)^y + (K_{rb} + K_0) T_b = H_d$
		$K_t (T_{m\acute{i}n})^y + (K_{rm\acute{a}x} + K_0) T_{m\acute{i}n} = H_d$
		$T_{m\acute{a}x} + T_a + T_b + T_{m\acute{i}n} = 4 T_{med}$
$N_{3c}$	vazão afluyente igual à vazão total efluente	$K_t (T_{m\acute{a}x}^*)^y + (K_0 + K_{ro}) T_{m\acute{a}x}^* = H_d + \Delta h$
		$K_t (T_a^*)^y + (K_0 + K_{ra}) T_a^* = H_d + \Delta h$
		$K_t (T_b^*)^y + (K_0 + K_{rb}) T_b^* = H_d + \Delta h$
		$T_{m\acute{a}x}^* + T_a^* + T_b^* = 3 T_{med}^*$
		$T_{med}^* = 4 T_{med} / 3$

Onde:

$T_{m\acute{a}x}^*, T_a^*$  e  $T_b^*$ : taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um filtro (m/dia);

$T_{med}^*$ : taxa média de filtração no final da lavagem dos filtros, quando a vazão afluyente igual a vazão total efluente (m/dia);

$T_{med}$ : taxa média de filtração durante a operação (m/dia);

$\Delta h$ : variação do nível d'água durante a lavagem,  $N_{3c} - N_{2c}$ , (m)

O modelo proposto pode ainda ser generalizado para um número de filtros  $N$ , conhecendo-se os parâmetros  $K_t$  (coeficiente de perda de carga turbulenta),  $y$  (expoente que define o comportamento da perda de carga turbulenta),  $K_{r0}$  (coeficiente de perda de carga laminar inicial),  $H_d$  (carga hidráulica disponível) e  $T_{med}$  (taxa média de filtração), durante a filtração e a lavagem, conforme descrito a seguir:

1) Durante a filtração:

$T_{m\acute{a}x} = F T_0$  F inicial entre 0,8 e 0,85.

$$K_{r0} = \frac{H_0 + H_i}{2 T_{m\acute{a}x}} \quad \text{Para } i = 0$$

$$H = K_t (T_i)^y + K_0 T_i + H_0 + H_i \quad \text{Para } 1 \leq i \leq (N - 1)$$

$$H_i = K_{ri-1} T_i$$

$$K_{ri} = \frac{H_0 + H_i}{T_i} \quad \text{Para } i = 0$$

$$\sum_{i=0}^N T_i = N T_{med}$$

2) Durante a lavagem:

$$K_t (T_i)^y + K_0 T_i + K_i T_i = H_d \quad \text{Para } 1 \leq i \leq N$$

$$\sum_{i=1}^N T_i = N T_{med}$$

$$K_t (T_i^*)^y + K_0 T_i^* + K_i T_i^* = H_d + \Delta h \quad \text{Para } 1 \leq i \leq (N - 1)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} T_i^* = (N - 1) T_{med}^*$$

$$\frac{N T_{med}}{(N - 1)} = T_{med}^*$$

A grande vantagem do modelo proposto por Di Bernardo (1986) é a simplicidade do equacionamento, obtida a partir da consideração de que não ocorre a variação do coeficiente de permeabilidade devido à retenção de impurezas no meio filtrante ao longo do tempo de operação do filtro. Este modelo apresenta bons resultados, entretanto não considera o efeito do armazenamento de água a montante dos filtros, fato que ocorre em grande parte das ETAs.

### 3.4.2 Modelo de Machado e Di Bernardo (1995)

O modelo de Machado e Di Bernardo (1995) adota as mesmas considerações do modelo anterior de Di Bernardo (1986) e o complementa com a introdução da análise da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros.

De acordo com Machado e Di Bernardo (1995), este modelo visa simular o efeito do armazenamento de água a montante dos filtros, fato que geralmente ocorre nas ETAs em

escala real, nas quais o tempo de transição entre o instante em que um filtro recém lavado é colocado em operação e aquele em que o somatório das vazões efluentes se iguala à vazão afluente, pode ser longo. Desta forma, quando o nível  $N_{1c}$  for atingido, o meio filtrante já estará com um determinado grau de colmatação, causando a elevação deste nível devido ao aumento da perda de carga. A elevação do nível  $N_{1c}$  é proporcional à capacidade adicional de armazenamento de água a montante da bateria de filtros.

Machado e Di Bernardo (1995) consideraram como o nível  $N_{1c}$  teórico aquele determinado pela taxa de filtração máxima segundo a metodologia de Di Bernardo (1986) e que também não ocorre a variação da resistividade durante o período de transição. O comportamento do nível de água no CCAF em função da taxa de filtração e das perdas de carga turbulenta e laminar, com o armazenamento a montante é representado na Figura 3.9, na qual a elevação do nível  $N_{1c}$  é representada por  $\Delta H_0$  e a diferença entre  $(N_{2c} - N_{1c})$  por  $H_1$ .

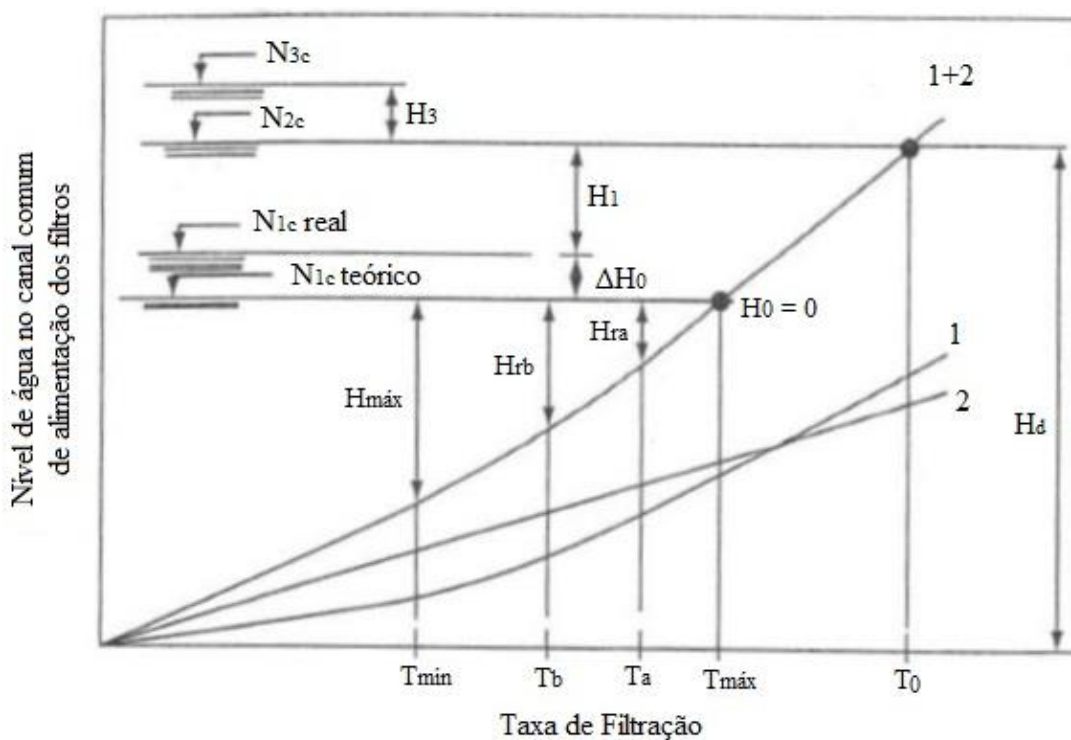


Figura 3.9 – Variação do nível de água no CCAF em função da taxa de filtração e das perdas de carga turbulenta e laminar, com armazenamento a montante dos filtros (Di Bernardo e Sabogal Paz, 2008).

Assim como no modelo de Di Bernardo (1986), as perdas de cargas mostradas na Figura 3.9 podem ser descritas por meio de uma equação similar a Equação 3.1. Na Tabela 3.8 é mostrado o desenvolvimento da modelação matemática, que permite a determinação das

taxas de filtração e dos níveis de água para cada filtro da bateria, considerando o armazenamento de água a montante dos filtros.

Tabela 3.8 – Taxas de filtração, perdas de carga, coeficiente de resistividade e equações básicas do modelo de Machado e Di Bernardo (Machado e Di Bernardo, 1995).

Nível	Filtro	Condição	T	Kr	Hr	Equações para o filtro F1
N1c	F1	Início	T <sub>máx</sub>	zero	zero	H <sub>0</sub> = 0 e ΔH <sub>0</sub> = 0
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>r0</sub>	H <sub>ra</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>rb</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>máx</sub>	
N2c	F1	antes da lavagem de F4	T <sub>máx</sub>	K <sub>r0</sub>	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub> = K <sub>ro</sub> T <sub>máx</sub>
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>ra</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>rb</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>máx</sub>	H <sub>máx</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>0</sub>	
N1c	F1	após F4 entrar em operação	T <sub>máx</sub>	zero	zero	$\frac{\Delta H_0 + H_1}{T_{máx}} = \frac{H_{ra}}{T_a}$ $\rightarrow H_{ra} = (\Delta H_0 + H_1) \frac{T_a}{T_{máx}}$
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>r0</sub>	H <sub>ra</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>rb</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>máx</sub>	
N2c	F1	antes da lavagem de F3	T <sub>máx</sub>	K <sub>r0</sub>	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	H <sub>ra</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub> = K <sub>ra</sub> T <sub>a</sub>
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>ra</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>rb</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>máx</sub>	H <sub>máx</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>0</sub>	
N1c	F1	após F3 entrar em operação	T <sub>máx</sub>	zero	zero	$H_{rb} = K_{ra} T_b$ $\frac{H_{ra} + \Delta H_0 + H_1}{T_a} = \frac{H_{rb}}{T_b}$ $\rightarrow H_{rb} = (\Delta H_0 + H_1 + H_{ra}) \frac{T_b}{T_a}$
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>r0</sub>	H <sub>ra</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>rb</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>máx</sub>	
N2c	F1	antes da lavagem de F2	T <sub>máx</sub>	K <sub>r0</sub>	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	H <sub>rb</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub> = K <sub>rb</sub> T <sub>b</sub>
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>ra</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>rb</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>máx</sub>	H <sub>máx</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>0</sub>	
N1c	F1	após F2 entrar em operação	T <sub>máx</sub>	zero	zero	$H_{rb} = K_{ra} T_b$ $\frac{H_{rb} + \Delta H_0 + H_1}{T_b} = \frac{H_{rmáx}}{T_{mín}}$ $\rightarrow H_{rmáx} = (H_{rb} + \Delta H_0 + H_1) \frac{T_{mín}}{T_b}$
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>r0</sub>	H <sub>ra</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>rb</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>máx</sub>	
N2c	F1	antes da lavagem de F1	T <sub>máx</sub>	K <sub>r0</sub>	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	H <sub>máx</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub> = K <sub>rmáx</sub> T <sub>mín</sub>
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>ra</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>rb</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>máx</sub>	H <sub>máx</sub> + ΔH <sub>0</sub> + H <sub>0</sub>	
N1c	F1	após F1 entrar em operação	T <sub>máx</sub>	zero	zero	ΔH <sub>0</sub> + H <sub>1</sub> = K <sub>ro</sub> T <sub>máx</sub>
	F2		T <sub>a</sub>	K <sub>r0</sub>	H <sub>ra</sub>	
	F3		T <sub>b</sub>	K <sub>ra</sub>	H <sub>rb</sub>	
	F4		T <sub>mín</sub>	K <sub>rb</sub>	H <sub>máx</sub>	

A determinação das taxas de filtração e das perdas de carga para um determinado nível  $N_{2c}$ , pode ser obtida de acordo com as etapas descritas a partir do modelo de Di Bernardo (item 3.4.1). Já para a determinação do nível  $N_{3c}$  e das taxas de filtração dos filtros remanescentes, considerou-se que o somatório das vazões efluentes não se iguala à vazão afluenta, já que ocorre o armazenamento a montante da bateria de filtros, resultando no equacionamento exibido na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Nível  $N_{3c}$  e as taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles do modelo de Machado e Di Bernardo (1995).

Nível	Condição	Equações
$N_{1c}$	antes de F4 ser retirado de operação para lavagem	$K_t (T_{m\acute{a}x})^{\gamma} + (K_{ro} + K_0) T_{m\acute{a}x} = H_d$
		$K_t (T_a)^{\gamma} + (K_{ra} + K_0) T_a = H_d$
		$K_t (T_b)^{\gamma} + (K_{rb} + K_0) T_b = H_d$
		$K_t (T_{m\acute{i}n})^{\gamma} + (K_{rm\acute{a}x} + K_0) T_{m\acute{i}n} = H_d$
		$T_{m\acute{a}x} + T_a + T_b + T_{m\acute{i}n} = 4 T_{med}$
$N_{3c}$	vazão afluenta igual à vazão total efluente	$K_t (T_{m\acute{a}x}^*)^{\gamma} + (K_0 + K_{ro}) T_{m\acute{a}x}^* = H_d + \Delta h$
		$K_t (T_a^*)^{\gamma} + (K_0 + K_{ra}) T_a^* = H_d + \Delta h$
		$K_t (T_b^*)^{\gamma} + (K_0 + K_{rb}) T_b^* = H_d + \Delta h$
		$T_{m\acute{a}x}^* + T_a^* + T_b^* = 4 T_{m\acute{a}x} + \frac{\Delta h}{dt} + \frac{Aa}{A}$
		$T_{med}^* = 4 T_{med} / 3$
		$T_{med\ arm}^* = \alpha T_{med}^*$
		$T_{med\ arm}^* = 4 T_{med} / 3$
		$T_{m\acute{a}x}^* + T_a^* + T_b^* = 3 T_{med\ arm}^*$

Onde:

$T_{m\acute{a}x\ arm}^*$ : taxa média de filtração no final da lavagem com armazenamento adicional a montante dos filtros (m/dia);

$dt$ : duração da lavagem (dia);

$Aa$ : área adicional de armazenamento a montante dos filtros (m<sup>2</sup>);

$A$ : área de um filtro da bateria (m<sup>2</sup>);

$\alpha$ : coeficiente experimental, determinado em função do armazenamento adicional e da taxa de filtração.

Ressalta-se que o modelo de Machado e Di Bernardo (1995) foi testado com dados experimentais de uma estação piloto, com e sem o armazenamento de água a montante, apresentando resultados próximos aos observados nos experimentos. Durante esta investigação experimental, os autores observaram também que as taxas de filtração e as variações do nível de água resultaram próximas aos valores obtidos pelo modelo de Di Bernardo (1986), o qual não considera o efeito do armazenamento de água a montante.

Desta forma, quando o armazenamento de água a montante dos filtros nas estações de tratamento de água não é significativo, o modelo de Di Bernardo (1986), que apresenta maior simplicidade com relação ao modelo de Machado e Di Bernardo (1995), pode ser utilizado sem grandes inconsistências.

### **3.5 ESTUDOS SOBRE A FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL E A INFLUÊNCIA DO MEIO FILTRANTE**

Segundo Gabriel (2000), a escolha pela utilização de um determinado modo de operação de filtro depende de fatores como: qualidade da água filtrada, duração da carreira de filtração, produção efetiva de água pelo filtro, operação e manutenção, capital e custos de operação, etc. Neste sentido, diversos estudos têm sido realizados a fim de ampliar os conhecimentos acerca da filtração com taxa declinante variável.

Akgiray e Saatçi (1988) trabalharam no desenvolvimento de um algoritmo computacional para modelar a operação de sistemas de taxa de filtração declinante variável, a partir de duas considerações distintas, são elas: a utilização média e da média harmônica da condutividade hidráulica para o cálculo da perda de carga laminar através do leito filtrante. O algoritmo apresentado pelos autores é capaz de prever as variações do nível de água, concentrações de efluentes e taxas de filtração individuais como funções do tempo. Os autores apresentam os resultados da modelagem que mostram as diferenças entre as previsões das duas abordagens, principalmente quanto a perda de carga e a concentração no efluente e indicam o emprego da condutividade média harmônica sempre que a lei de Darcy for assumida como válida.

Mendes e Gabriel (2000), por sua vez, propuseram uma nova metodologia simples e prática para a determinação dos níveis operacionais e taxas de filtração numa bateria de filtros operados com taxa declinante, baseada no Modelo de Di Bernardo (1986). A solução gráfica proposta constitui-se em uma ferramenta de uso simplificada para dimensionamento de

sistemas de filtração com taxa declinante variável, obtendo-se as taxas de filtração na lavagem e operação dos filtros e os níveis de água no canal comum ( $N_{1c}$ ,  $N_{2c}$  e  $N_{3c}$ ).

Dabrowski (2006) estudou os métodos existentes para resolução dos conjuntos de equações que governam a filtração com taxa declinante variável, a fim de melhorá-los, reduzindo assim o número de equações e variáveis utilizadas. O autor propôs soluções para o modelo de Arboleda *et al.* (1985) e também para o modelo de Di Bernardo (1986). A principal conclusão deste trabalho foi o desenvolvimento de soluções aproximadas para o segundo modelo, que não necessita de coeficientes experimentais como o primeiro, que possibilitou a criação de ábacos que são úteis para determinação preliminar dos níveis de água sobre o leito filtrante. Tal fato foi possível porque a aproximação das taxas de filtração para uma bateria de filtros pode ser determinada através de uma progressão geométrica.

Eyvaz *et al.* (2013) avaliaram o comportamento hidráulico de um sistema de filtração com taxa declinante, especialmente a influência da taxa de filtração e da dosagem de coagulante na variação dos níveis de água no CCAF e também como as taxas de filtração em um filtro variam ao longo do tempo, a fim de se verificar a generalização de algumas simplificações realizadas na modelagem da filtração com taxa declinante. Para tal, foram realizados experimentos em instalação piloto com uma bateria de 4 filtros operando em taxa declinante variável e, para comparação, um filtro em paralelo a bateria operando com taxa constante. A água utilizada no experimento descrito por Eyvaz *et al.* (2013) possuía turbidez de 10 uT e era armazenada em reservatório de 3 m<sup>3</sup> com velocidade de agitação de 300 rpm para evitar a sedimentação e garantir a uniformidade da turbidez. A água era coagulada e então distribuída gravitacionalmente aos filtros de camada filtrante simples com 109 cm de espessura, constituída de areia com tamanho efetivo de 0,82 mm e coeficiente de uniformidade de 1,45. Durante os experimentos foram variadas a taxa de filtração e a dosagem de coagulante e foram monitorados o nível de água e a perda de carga.

De modo geral, os resultados obtidos por Eyvaz *et al.* (2013) estão de acordo com os estudos disponíveis na literatura, nos quais a taxa de cada filtro diminui de forma gradual, permanecendo aproximadamente constante entre as lavagens. Os autores avaliaram a simplificação assumida no modelo de Cleasby (1993), que sugere os valores de 0,7 e 1,5 para as relações  $T_{min}/T_{med}$  e  $T_{max}/T_{med}$ , respectivamente. Os autores observaram que a relação  $T_{max}/T_{med}$  variou entre 1,0 e 2,0 e a relação  $T_{min}/T_{med}$  variou entre 0,4 e 0,9. Esta última

resultou significativamente diferente de 0,7 quando  $T_{\max}/T_{\text{med}}$  foi cerca de 1,5, fato que contraria a simplificação de Cleasby (1993). Por fim, constatou-se ainda que a dosagem de coagulante tem grande influência na definição dos níveis de água, de modo que a variação entre os níveis  $N_{1c}$  e  $N_{2c}$  sempre aumentou à medida que a dosagem do coagulante também foi aumentada.

Torres *et al.* (2014) estudaram a influência do método de operação sobre o processo de filtração da água clarificada do Rio Cauca, através de experimentos em escala piloto realizados na Estação de Tratamento de Água de Puerto Mallarino, localizada em Cali na Colômbia. O meio filtrante foi adotado a partir de estudos anteriores, com camada dupla: 70 cm de antracito com tamanho efetivo de 1,16 mm e CU de 1,41; e 30 cm de areia com tamanho efetivo de 0,56 mm e CU de 1,2. Foram realizados ensaios com taxa constante e declinante em uma bateria de quatro filtros pilotos e para efeito de comparação entre os modos de operação foram consideradas as perdas de carga e a turbidez da água filtrada.

Os autores concluíram que o modo de operação com taxa declinante possibilitou o melhor desenvolvimento dos filtros, obtendo-se água com turbidez inferior durante o período de máxima eficiência (turbidez inferior a 0,15 uT em mais de 70% do tempo com filtros operados com taxa declinante e de 52% quando operados com taxa constante) e a menor evolução da perda de carga (0,80 m quando operado com taxa declinante e de 1,10 m em taxa constante, para uma carreira de filtração de 40 horas ), resultante da melhor distribuição dos sólidos sobre o meio filtrante que permite reduzir o risco de transpasse.

Huaraca (2015) avaliou a viabilidade da mudança do modo de operação da ETA Puengasí, localizada em Quito no Equador, que opera com taxa de filtração e nível constantes, para operação com taxa declinante e nível constante. Para manter a taxa de filtração e o nível de água constantes, a ETA utiliza uma válvula reguladora que possui mecanismos móveis e que ao longo do tempo vem apresentando desgastes, demandando manutenção contínua. As falhas apresentadas em tais válvulas ocasionam pressões negativas que, por sua vez, liberam bolhas de ar, que reduzem a seção de escoamento, diminuindo então a duração da carreira de filtração e a qualidade da água filtrada.

Para a avaliação da facilidade de alteração do modo de operação o autor realizou experimentos em um dos filtros da própria ETA, em escala real, com meio filtrante constituído de areia,



antracito e granada. A estrutura de saída do filtro foi alterada para obtenção da taxa declinante com nível constante, por meio da utilização de dois dispositivos, um orifício normalizador e uma estrutura hidráulica que funcionava como vertedor, com diferentes diâmetros e cargas, respectivamente. Durante a operação deste filtro, foram monitoradas as vazões, as perdas de carga, a turbidez efluente e a duração da carreira de filtração.

Huaraca (2015) concluiu que o orifício com diâmetro de 230 mm foi o que melhor se adaptou às condições da ETA, gerando vazão média entre 157,8 e 159,5 L/s e duração média da carreira de filtração entre 53,7 e 66 horas. Já para o vertedor, a vazão média variou entre 162 e 185,5 L/s, com duração da carreira de filtração entre 43 e 47 horas, dependendo da carga hidráulica disponível. Desta forma, o orifício se mostrou como uma boa alternativa, já que a duração da carreira de filtração média da ETA o seu modo de operação tradicional é de 59 horas.

Santos (2004) estudou a eficiência de redução de turbidez, cor aparente e fitoplâncton utilizando diferentes tipos de coagulantes visando o tratamento por filtração direta descendente, com taxa declinante variável, da água da represa Vargem das Flores, localizada em Betim/MG. Foram realizados experimentos de filtração em escala de bancada com filtros de camada simples de areia com diâmetro de 0,597 a 0,635 mm e em escala piloto também com filtros de areia com coeficiente de uniformidade próximo de 2 e tamanho efetivo dos grãos de 2,38 mm. A instalação piloto foi operada com taxa de filtração constante e nível variável. A taxa média de filtração foi 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, a relação entre a taxa máxima e a média de 1,5 e variação entre o nível N<sub>1C</sub> e o nível N<sub>2C</sub> de 0,15 m.

A principal conclusão do trabalho de Santos (2004) foi que a carreira de filtração para o filtro piloto foi mais longa quando se utilizou a água pré-clorada e coagulada com sulfato de alumínio da própria ETA, contudo a qualidade da água filtrada (turbidez e de cor aparente remanescentes) foi pior do que a obtida com o uso dos demais coagulantes testados, nas condições de coagulação realizadas na instalação piloto. A duração da carreira de filtração na instalação piloto foi de 3,24 horas para a água pré-clorada e coagulada com sulfato de alumínio e, através da metodologia descrita por Di Bernardo (1993), foi estimada em 25 horas para ETA em escala real operando com taxa de filtração declinante variável. O resultado foi considerado satisfatório uma vez que a duração média da carreira de filtração na ETA é menor que 16 horas, podendo chegar a 10 horas.

Costa (2001) trabalhou no desenvolvimento de uma metodologia que permitisse comparar um sistema com taxa declinante variável em escala real testando-se os parâmetros de projeto numa instalação piloto, a fim de se adequar o modo de operação da ETA Rio Descoberto, localizada em Brasília no DF. A necessidade de adequação desta ETA surgiu em decorrência das alterações na qualidade da água bruta do manancial de captação e também devido à ampliação da estação. Para tal foram realizados experimentos em um filtro real da própria estação e em escala piloto.

Costa (2001) determinou as curvas de perda de carga no filtro da ETA e no filtro piloto e a partir do conhecimento de parâmetros operacionais da ETA (taxa de filtração média, carga hidráulica máxima, do número de filtros, da área de armazenamento adicional e da equação de perda de carga total) foi aplicada a metodologia de Machado e Di Bernardo (1995). Para compatibilização das perdas de carga entre o filtro real e o piloto foi instalada uma válvula do tipo borboleta na tubulação de saída da instalação piloto, de modo a inserir um determinado valor de perda de carga para que as curvas resultassem iguais. A previsão da duração da carreira de filtração contendo qualquer número de filtros foi determinada a partir da metodologia de Teixeira (1991) e o autor obteve a duração mínima de 73,3 horas da carreira de filtração para a taxa máxima de  $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  na instalação piloto, valor superior à duração carreira da ETA, que era de cerca de 30 horas, para água bruta com valor de turbidez de até 6 uT. Sobre a turbidez da água filtrada, constatou-se que o foi necessário um período de amadurecimento dos filtros de até 60 min para que produzissem água com turbidez inferior a 1 uT.

Cezar *et al.* (2005) avaliaram em escala piloto o desempenho de diferentes meios filtrantes nos processos de filtração direta descendente e de flotação por ar dissolvido seguida de filtração descendente para tratamento de águas com baixa turbidez e presença de algas na Estação de Tratamento de Água Brasília. Foram testados 3 meios filtrantes distintos, são eles: MF 1 de camada única areia (tamanho efetivo de 2,1 mm, coeficiente desuniformidade de 1,4 e espessura de 90 cm); MF 2 de camada dupla (areia: tamanho efetivo de 0,6 mm, coeficiente de desuniformidade de 1,25 e espessura de 30 cm; antracito: tamanho efetivo de 0,83 mm, coeficiente de desuniformidade de 2,01 e espessura 50 cm); e MF 3 de camada reversa. A carga hidráulica disponível para cada filtro foi cerca de 1,80m e os filtros foram operados com nível constante e taxa de filtração fixa de  $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ .

Os autores observaram que para uma turbidez que variou entre 1 e 5,6 uT, o filtro piloto MF1, de granulometria similar ao dos filtros da ETA Brasília na época, produziu água de qualidade comparável aos filtros de granulometria mais fina (filtro de camada dupla e filtro de camada reversa), porém, com duração da carreira de filtração mais longa, caracterizando-se por uma filtração com elevado grau de penetração de impurezas. Já o MF 2, apesar de produzir água de boa qualidade as carreiras de filtração não excederam 10 horas de duração.

Cezar *et al.* (2005) concluíram que a adoção da flotação, mesmo quando apresentando baixa eficiência de remoção de turbidez, refletiu positivamente, tanto no desenvolvimento da perda de carga dos filtros de camada dupla (MF2) e similar ao da ETA-Brasília (MF1), quanto na qualidade da água produzida. Também foi concluído que o filtro de camada única de areia foi o único que se mostrou capaz de atender a flexibilidade de atuar com bom desempenho tanto na sequência de filtração direta como na filtração precedida de flotação, devendo-se atentar ao transpasse.

Desta forma, os estudos desenvolvidos por Akgiray e Saatçi (1988), Mendes e Gabriel (2000), Dabrowski (2006) e Eyvaz *et al.* (2013) evidenciam a tentativa de consolidação e melhoria dos modelos matemáticos para sistemas de filtração com taxa declinante, abordando aspectos matemáticos e da própria verificação das hipóteses adotadas nos modelos vigentes. A partir de tais modelos, os estudos de Santos (2004), Torres *et al.* (2014), Huaraca (2015) e Costa (2001) avaliaram a viabilidade de aplicação do sistema de taxa de filtração declinante e mostram que este sistema apresenta maior eficiência que o sistema de taxa de filtração constante, quanto à qualidade da água filtrada e duração da carreira de filtração. Já Cezar, M. C. M *et al.* (2005) avaliaram o desempenho de diferentes meios filtrantes nos processos de filtração direta descendente e de flotação por ar dissolvido seguida de filtração descendente para tratamento de águas com baixa turbidez e presença de algas na Estação de Tratamento de Água Brasília.

## 4 METODOLOGIA

Com os objetivos gerais de adequar o meio filtrante e o modo de operação das unidades de filtração da ETA Brasília, localizada no Distrito Federal, a metodologia experimental do presente trabalho buscou avaliar o efeito da taxa de aplicação e da granulometria do meio filtrante na duração da carreira de filtração para filtros que operam com taxa de filtração declinante e nível variável. Para tal estimativa da duração da carreira de filtração, foi utilizado o método proposto por Di Bernardo e Teixeira (1991, apud Di Bernardo, 1993) e utilizado com sucesso por Costa (2001) e Silva (2004). Neste método, que será melhor detalhado ao longo deste capítulo, opera-se uma instalação piloto com taxa de filtração constante e nível variável e, a partir da duração da carreira de filtração obtida na instalação piloto, estima-se a duração da carreira de filtração para os filtros reais em taxa de filtração declinante e nível variável.

A metodologia adotada no presente trabalho encontra-se dividida em quatro partes (Figura 4.1), são elas: 1) montagem, na ETA Brasília, da instalação piloto com operação em taxa de filtração constante e nível variável; 2) definição das condições de operação dos filtros piloto; 3) experimentos em filtro piloto; 4) estimativa da duração da carreira de filtração para ETA em escala real operando com taxa de filtração declinante e nível variável.

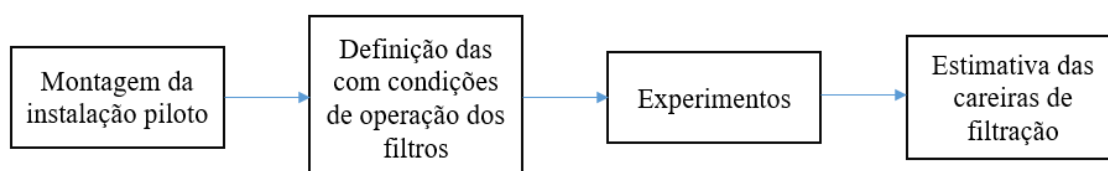


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia adotada.

### 4.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

A instalação piloto, apresentada esquematicamente na Figura 4.2, foi construída e operada na própria Estação de Tratamento de Água Brasília, com o objetivo de se utilizar a própria água da ETA para alimentação dos filtros piloto.

A fim de se obter maior flexibilidade e aproveitamento do espaço disponível para a montagem da instalação piloto, todas as ligações de água filtrada e de água de lavagem foram

realizadas por meio de conexões roscáveis. Também se optou pela substituição dos tubos rígidos de PVC por mangueira trançada, que apesar de ser relativamente flexível não deforma com facilidade.

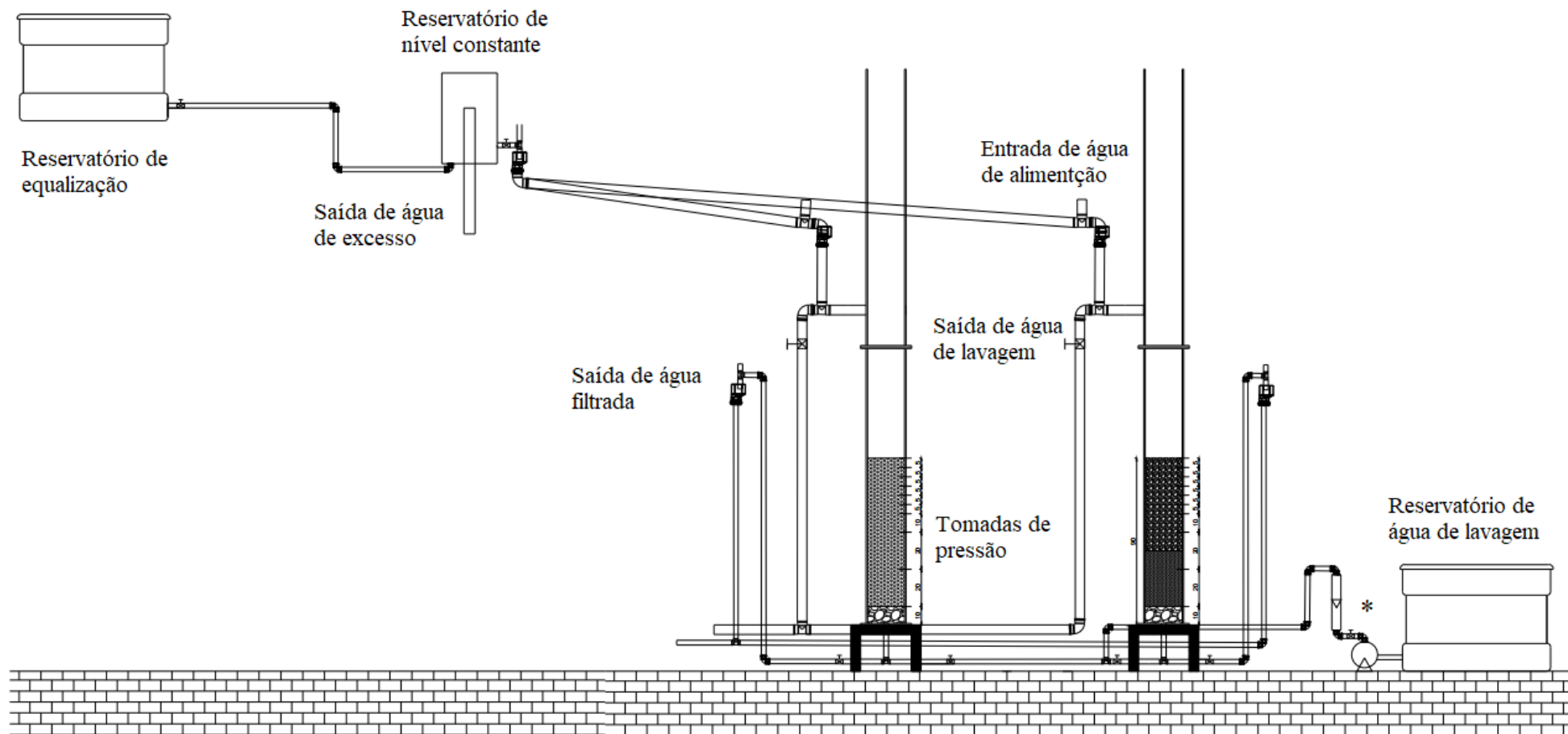
Para a alimentação dos filtros e para a coleta da água de lavagem, em sentido ascensional, foram utilizados tubos e conexões para esgoto, em função de serem mais leves.

Conforme pode ser visto na Figura 4.2, foram utilizados dois filtros em acrílico idênticos com altura de 3,0 m e com diâmetro interno de 200 mm, de forma a garantir que a relação entre o diâmetro do filtro e o diâmetro do maior grão do meio filtrante fosse superior a 50, a fim de se evitar as interferências relacionadas ao efeito de parede. O efeito de parede ocorre em função da porosidade do meio granular em contato com a parede da coluna de filtração ser maior que a porosidade no interior do meio, ocasionando o surgimento de caminhos preferenciais na interface meio filtrante-parede (Ives, 1996 *apud* Di Bernardo *et al.*, 2003).

A camada suporte utilizada possui espessura de 0,1 m e é constituída de pedregulho fino, já a camada filtrante possui 0,8 m de espessura, sendo o filtro FA de camada simples de areia e o filtro FAA de camada dupla de antracito e areia.

O primeiro meio filtrante FA possui camada simples de areia, praticamente uniforme, e apresenta granulometria similar à do meio filtrante utilizado na ETA Rio Descoberto. As principais vantagens potenciais do meio filtrante com camada simples sobre o meio filtrante com camada dupla se relacionam à questão de estratificação da camada filtrante e à perda de material durante a lavagem.

Já o segundo meio filtrante FAA possui camada dupla de antracito e areia e possui granulometria similar à do meio filtrante sugerido no estudo encomendado pela Caesb, denominado “Projeto executivo das adequações emergenciais necessárias para a melhoria da performance da Estação de Tratamento de Água do Plano Piloto” realizado em 2017 e 2018, com vistas a melhorar a eficiência da estação.



\* Bomba, registro e rotâmetro para controle das vazões de lavagem.

Figura 4.2 – Esquema da instalação piloto de filtração.

As características granulométricas de cada camada dos meios filtrantes definidas nos respectivos projetos originais estão detalhadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características das camadas filtrantes adotadas.

Parâmetro	Meio Filtrante FA	Meio Filtrante FAA	
	Areia	Areia	Antracito
Tamanho do menor grão (mm)	1,19	nd	nd
Tamanho do maior grão (mm)	1,68	nd	nd
Espessura da camada (m)	0,8	0,3	0,5
Tamanho efetivo (mm)	1,2 a 1,3	$0,53 \pm 0,2$	$1,00 \pm 0,05$
Coefficiente de Uniformidade $\leq$	1,2	1,5	1,4
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) *	nd	$\geq 2630$	$1.600 \pm 50$

nd: não definido; \* Após 24 horas embebida em água.

A partir das características granulométricas apresentadas na Tabela 4.1, foram definidas as respectivas curvas granulométricas, exibidas na Figura 4.3.

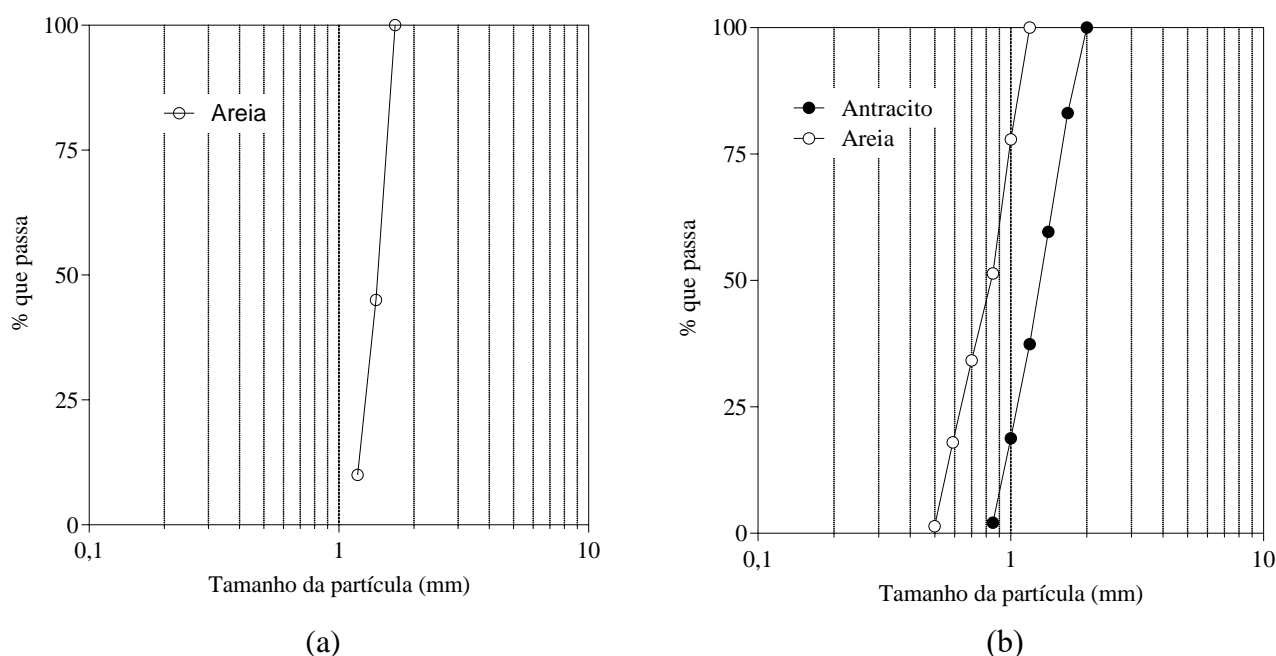


Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos meios filtrantes estudados: (a) filtro de areia FA e (b) filtro de antracito e areia FAA.

Ressalta-se que a camada suporte possui, na instalação piloto, a principal função de distribuir uniformemente a água durante a lavagem dos filtros. Deste modo, as características granulométricas do pedregulho fino utilizado não foram analisadas.

Para se evitar que os grãos da camada suporte entrassem nas tubulações de coleta de água filtrada foi colocado uma tela metálica entre o fundo do filtro e a camada suporte, que possui granulometria decrescente de baixo para cima.

Após a definição das curvas granulométricas de cada meio filtrante, e antes da realização das conexões entre as unidades da instalação piloto, a camada suporte e o meio filtrante foram colocados nos filtros, Figura 4.4.



Figura 4.4 - Montagem dos meios filtrantes e da camada suporte.

Para o acompanhamento da perda de carga ao longo da carreira de filtração e do avanço da frente de impurezas foram utilizados 10 piezômetros distribuídos nos pontos de tomada de pressão exibidos na Figura 4.5.



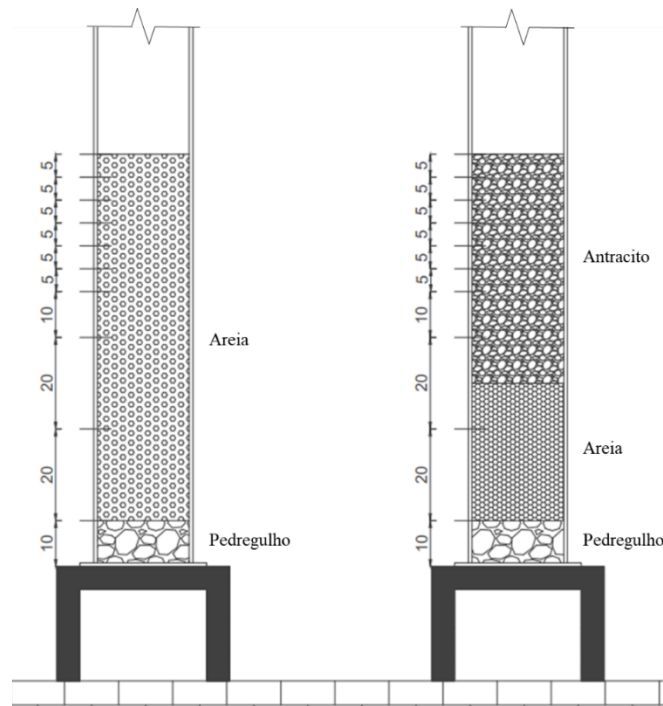


Figura 4.5 – Detalhe dos filtros piloto e dos pontos de tomada de pressão, em centímetros.

A configuração final da instalação piloto utilizada para realização dos experimentos de filtração é mostrada na Figura 4.6.

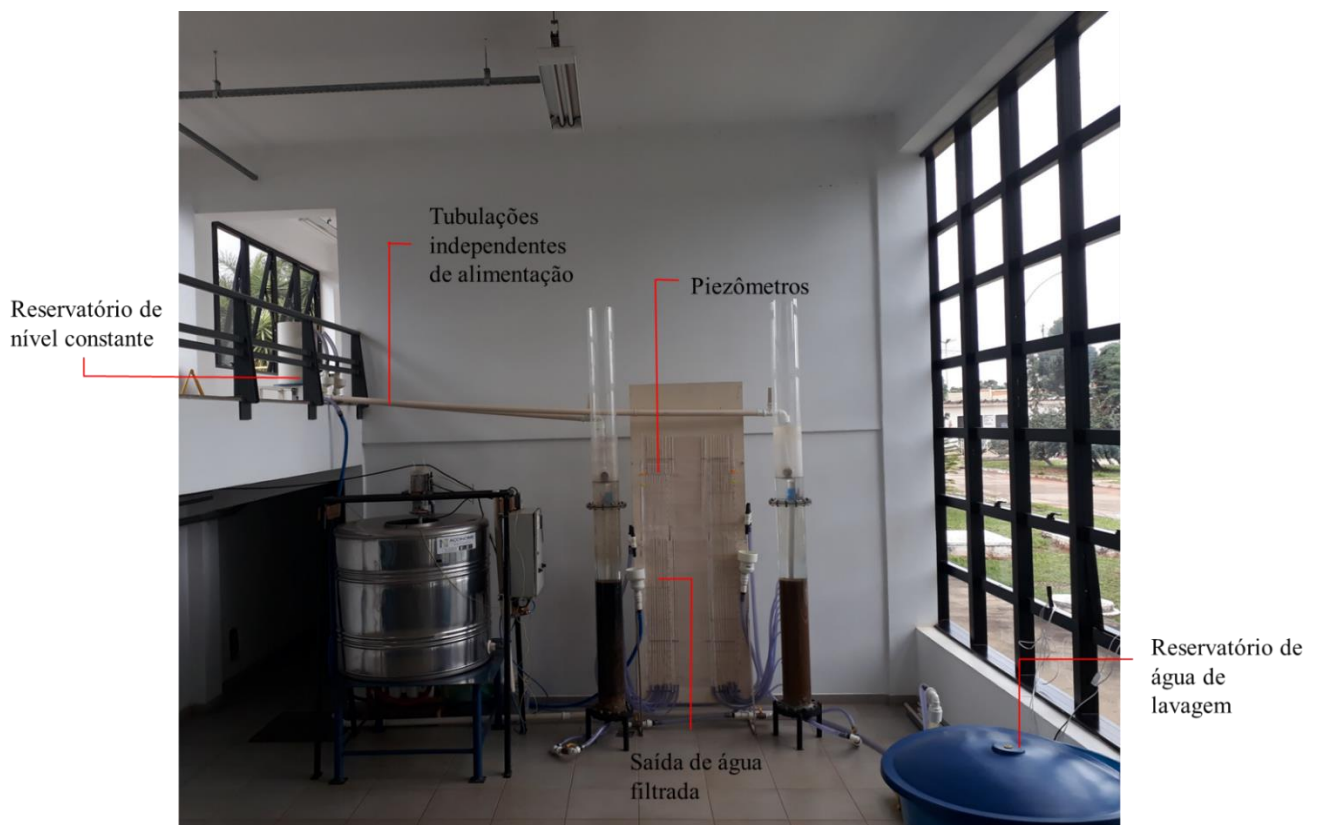


Figura 4.6 – Configuração final da instalação piloto de filtração.

Os ensaios de filtração foram realizados com a água clarificada e floculada na própria estação, coletada no filtro de número 15 e no canal de água floculada, respectivamente. A água era conduzida por bombeamento até o reservatório de equalização com volume de 1000 L e, em seguida, era direcionada por gravidade para o reservatório de nível constante com volume de 21,21 L a montante dos filtros piloto. Ressalta-se que o reservatório de nível constante possui a função de garantir que vazões se mantenham aproximadamente constantes nos registros de alimentação dos filtros.

Em seguida, a água clarificada ou coagulada, era então distribuída para os filtros piloto de fluxo descendente através de tubulações independentes com registros para o controle da vazão de alimentação e da taxa de filtração, Figura 4.7. Os filtros operavam em paralelo. Para a verificação da vazão e para a determinação da relação entre a vazão e a abertura dos registros foram realizados testes de medição volumétrica de vazões, calibrando-se os registros para as vazões desejadas.



Figura 4.7 – Reservatório de nível constante para controle da vazão de alimentação dos filtros.

Tanto a entrada quando a saída dos filtros operam em descarga livre, isto é, estão submetidos à pressão atmosférica. A fim de se evitar influências no escoamento a montante e jusante das entradas e saídas dos filtros, o nível da saída de água filtrada foi fixado acima do topo meio

filtrante, considerando as perdas de carga, de modo que os níveis de água na entrada e na saída fossem inicialmente iguais.

A lavagem dos filtros foi realizada com a água filtrada da própria ETA. Cada filtro foi lavado individualmente e independente do outro. A água de lavagem era armazenada em um reservatório com capacidade de 350 L, que era constantemente reabastecido, a partir do qual a água era bombeada para cada filtro com a respectiva velocidade de lavagem, verificada através de um rotâmetro instalado na saída da bomba, Figura 4.8.



Figura 4.8 – Sistema de lavagem dos filtros.

Ressalta-se que a fluidificação do meio filtrante é de extrema importância para que as partículas de impurezas retidas no filtro sejam removidas durante a lavagem e para tal deve-se utilizar a velocidade de lavagem adequada. A velocidade de lavagem inicial foi calculada a partir das características granulométricas dos dois filtros como, por exemplo, o tamanho efetivo dos grãos, espessuras das camadas e densidade dos grãos. Posteriormente, a velocidade foi corrigida na própria instalação piloto e com o auxílio de registro e rotâmetro para promover a expansão de 20% do meio filtrante.

A velocidade da água de lavagem utilizada foi aquela que promoveu a expansão e fluidificação do meio filtrante em 20%, sendo de 0,023 m/s para o filtro de areia FA e de

0,012 m/s para o filtro de antracito e areia FAA. Cada lavagem teve duração de aproximadamente 15 minutos.

O rotâmetro instalado na saída da bomba possibilita a aferição de vazões entre 0 e 2700 L/hora e teve grande papel para que a velocidade da água de lavagem fosse mantida nos valores adequados, contribuindo para que não houvesse o arraste de partículas e, no caso do filtro de camada dupla FAA, não houvesse a mistura intensa das camadas de antracito e areia.

Após a conclusão da instalação das unidades de filtração piloto, deu-se início a realização dos estudos experimentais.

## **4.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

Antes da realização dos experimentos em escala piloto foi necessário a definição dos parâmetros de operação da instalação piloto, conforme o método de Di Bernardo e Teixeira (1991, *apud* Di Bernardo, 1993), são eles: taxa de filtração no filtro mais limpo da bateria e os níveis  $N_{1c}$  e  $N_{2c}$ , a partir de cálculos com base na configuração dos filtros em escala real.

No método de Di Bernardo e Teixeira (1991, *apud* Di Bernardo, 1993) é possível se estimar a duração da carreira de filtração de um filtro em uma bateria que opera com taxa de filtração declinante e nível variável a partir de dados obtidos em uma instalação piloto que opera com taxa constante e nível variável. Este método é composto pelas seguintes etapas:

- 1) Dimensiona-se o sistema de filtração da ETA em escala real, obtendo-se a curva de perda de carga total (laminar e turbulenta) nas unidades de filtração ;
- 2) Aplica-se o modelo matemático, como o modelo de Di Bernardo (1986), para as condições reais da ETA (taxa de filtração média, carga hidráulica disponível, número de filtros da bateria e perda de carga nos filtros), obtendo-se então os valores de  $N_{1c}$ ,  $N_{2c}$  e a taxa de filtração máxima;
- 3) Constrói-se uma instalação piloto de filtração para ser operada com taxa de filtração constante e nível variável, sendo utilizada a taxa de filtração máxima, ou seja, a taxa observada no filtro mais limpo da bateria. Nesta etapa, monitora-se, através de piezômetros a evolução da perda de carga no meio filtrante ao longo da carreira de filtração, obtendo-se uma curva semelhante a apresentada na Figura 4.9;

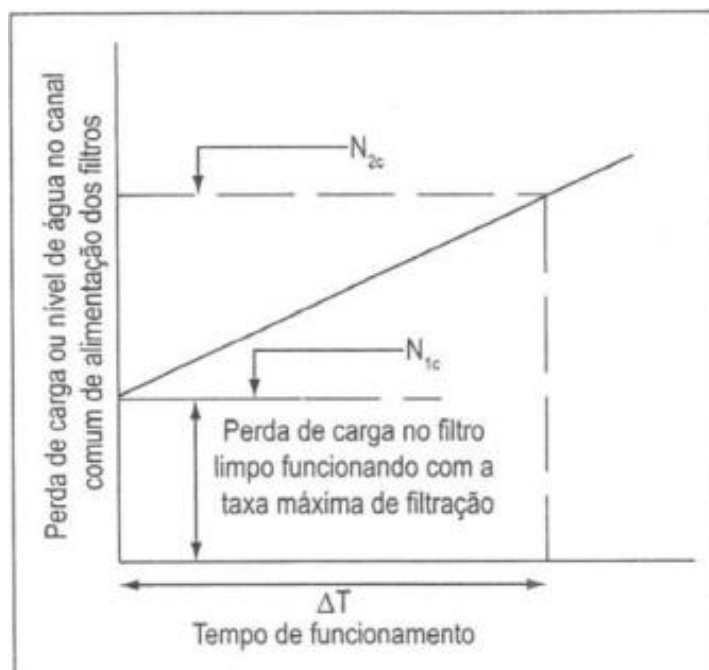


Figura 4.9 – Variação típica da perda de carga em um filtro de taxa declinante.  
Fonte: Di Bernardo e Sagobal Paz, 2008.

- 4) Determina-se, a partir dos valores de  $N_{1c}$  e  $N_{2c}$  obtidos na etapa 2, o intervalo de tempo  $\Delta T$  correspondente a tal variação de nível, através da curva de perda de carga total no meio filtrante obtida na etapa 3, conforme mostrado na Figura 4.9;
- 5) Multiplica-se o intervalo de tempo  $\Delta T$ , obtido na etapa 4, pelo número de filtros da bateria, obtendo-se a duração da carreira de filtração para ETA operando em taxa de filtração declinante e nível variável.

Ressalta-se ainda que os dados provenientes das etapas 1 e 2 descritas no método de Di Bernardo e Teixeira (1991, *apud* Di Bernardo, 1993) foram gerados no estudo de consultoria encomendado pela Caesb, intitulado “Projeto executivo das adequações emergenciais necessárias para a melhoria da performance da Estação de Tratamento de Água do Plano Piloto” realizado em 2017 e 2018.

Na etapa 1, a partir das dimensões das unidades de filtração da ETA Brasília e das alterações propostas no referido relatório, foi desenvolvida a equação geral de perda de carga nos filtros da estação, dada pela Equação 4.1.

$$H = 4,103 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 6,9 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,85} + 3,29 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,667} + 0,8 \cdot 10^{-3} T^1 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,268} \quad \text{Equação 4.1}$$

A Equação 4.1 juntamente com os dados operacionais das unidades de filtração da ETA, tais como taxa de filtração média, carga hidráulica disponível e número de filtros da bateria foram inseridos no modelo da etapa 2, de Di Bernardo (1986), considerando-se dois cenários distintos para o cálculo dos parâmetros de operação, com base na abertura da válvula borboleta de controle da saída da água filtrada. O cenário 1 representa a situação na qual a válvula borboleta está com abertura de 77,7% e o cenário 2 com abertura de 100%.

O resultado gerado no modelo para os dois cenários avaliados, apresentados no estudo de consultoria denominado “Projeto executivo das adequações emergenciais necessárias para a melhoria da performance da Estação de Tratamento de Água do Plano Piloto”, é exibido na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de entrada e saída do modelo de filtração para os cenários 1 e 2.

	<b>Dados de Entrada do Modelo</b>	<b>Dados de saída do Modelo</b>
<b>Cenário 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- H = 1,52 m;</li> <li>- Taxa média de filtração: 280 m/d;</li> <li>- Número de filtros: 12;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taxa média de filtração = 280 m/d;</li> <li>- Taxa de filtração no filtro mais limpo = 361,73 m/d;</li> <li>- Taxa de filtração no filtro mais sujo (Filtro 12) <math>\approx</math> 214 m/d;</li> <li>- T<sub>max</sub>/T<sub>med</sub> = 1,29;</li> <li>- Nível N<sub>1c</sub> (após lavagem filtro mais sujo) = 1,44 m;</li> <li>- Nível N<sub>2c</sub> (logo antes da lavagem do filtro mais sujo) = 1,52 m;</li> <li>- Diferença (N<sub>1c</sub>-N<sub>2c</sub>) = 0,076 m.</li> </ul>
<b>Cenário 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- H = 1,52 m;</li> <li>- Taxa média de filtração: 280 m/d;</li> <li>- Número de filtros: 12;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taxa média de filtração = 280 m/d;</li> <li>- Taxa de filtração no filtro mais limpo = 455,3 m/d;</li> <li>- Taxa de filtração no filtro mais sujo (Filtro 12) = 143,65 m/d;</li> <li>- T<sub>max</sub>/T<sub>med</sub> = 1,63;</li> <li>- Nível N<sub>1c</sub> (após lavagem filtro mais sujo) = 1,371 m;</li> <li>- Nível N<sub>2c</sub> (logo antes da lavagem do filtro mais sujo) = 1,520 m;</li> <li>- Diferença (N<sub>1c</sub>-N<sub>2c</sub>) = 0,149 m.</li> </ul>

O cenário 2 apresenta uma relação entre a taxa de filtração máxima e média ( $T_{max}/T_{med}$ ) de 1,63. Segundo Di Bernardo (1986), o valor de tal relação deve estar entre 1,3 e 1,5. Desta forma, para que tal recomendação seja cumprida, a válvula borboleta na saída dos filtros deve ser parcialmente fechada, de modo que resulte em um valor de  $T_{max}/T_{med}$  contida entre 1,3 e 1,5, conforme foi obtido no cenário 1, com fechamento de 77,7%.

De posse do valor da taxa máxima de filtração e da variação admitida entre os níveis  $N_{1c}$  e  $N_{2c}$ , os filtros piloto foram operados com taxa de filtração constante e nível variável para se poder estimar a duração da carreira de filtração nos filtros em escala real. A partir dos dois cenários analisados, os estudos experimentais foram divididos em duas etapas, são elas:

- **ETAPA I:** Nesta etapa os filtros piloto foram alimentados com água clarificada e com taxa de filtração de  $455,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ .
- **ETAPA II:** Nesta etapa os filtros piloto foram alimentados com água clarificada e, posteriormente floculada, com taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ .

Com relação a Etapa II, foram ainda realizadas análises de tamanho de flocos antes e depois do bombeamento, a fim de se verificar se após o bombeamento a água floculada apresentaria flocos grandes que intensificariam o mecanismo físico de peneiramento e causariam a rápida colmatção da camada inicial do meio filtrante.

Durante o período de operação dos filtros piloto foram coletadas amostras de água de alimentação e de água filtrada nos dois filtros testados, para avaliação da eficiência de remoção de turbidez. Também foram registradas as perdas de carga ao longo do tempo para avaliação do avanço da frente de impurezas e para se obter os parâmetros para estimativa da duração da carreira de filtração em escala real.

Após o início de uma carreira de filtração e o nível mínimo de água no filtro (que depende do nível de saída de água filtrada e da taxa de aplicação) ter sido atingido, dava-se início o monitoramento da evolução da perda da carga e da turbidez na instalação piloto. A carreira de filtração na instalação piloto era encerrada quando o nível de água  $N_{2c}$  fosse atingido.

A partir dos valores de duração da carreira de filtração nos filtros piloto ( $\Delta T$ ) e do número de filtros da bateria (12 filtros, no caso da ETA Brasília), foram obtidas as estimativas das durações das carreiras de filtração em escala real, por meio da multiplicação da duração da

carreira de filtração obtida na instalação piloto pelo número de filtros da bateria.

A qualidade da água de alimentação dos filtros e da água filtrada na instalação piloto foi monitorada através do acompanhamento da turbidez ao longo da carreira de filtração. Além desses parâmetros e ainda com relação a qualidade da água, foram coletados outros dados de monitoramento realizado na ETA em todas as etapas do tratamento, são eles: cor aparente, turbidez e pH, cujas metodologias de análise são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Metodologia a ser utilizada para determinação dos parâmetros monitorados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Metodologia</b>
<b>Turbidez</b>	Nefelométrico
<b>Cor verdadeira e aparente</b>	Espectrofotométrico
<b>pH</b>	Potenciométrico

Além das análises listadas na Tabela 4.3, no horário de realização dos experimentos foram coletados, junto aos responsáveis pela operação da ETA Brasília, os dados relativos à dosagem de coagulante, à vazão de operação da estação e à porcentagem de contribuição de cada manancial.



## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após as atividades de preparação e montagem da instalação piloto e de definição dos parâmetros de operação, deu-se início a Etapa experimental I, com a realização dos experimentos de filtração com água de alimentação clarificada e com a taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.

Posteriormente, foi realizada a Etapa II, na qual foram utilizados dois tipos de água para alimentação dos filtros com características distintas: a água clarificada e a água floculada, sendo esta última com a finalidade de simular uma situação crítica de turbidez na ETA Brasília. Na etapa II foi testada a taxa de aplicação de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, tanto para a água clarificada quanto para a água floculada.

Ressalta-se ainda que a água utilizada para alimentação dos filtros nas Etapas I e II foi, respectivamente, clarificada e floculada na própria ETA, de forma a reproduzir ou simular o comportamento dos filtros na escala real.

O trabalho experimental na instalação piloto ocorreu durante o mês de novembro de 2018, analisando-se duas taxas de filtração e qualidades distintas de água de alimentação, totalizando 13 experimentos para o filtro de camada simples de areia (FA) e 15 experimentos para o filtro de camada dupla de areia e antracito (FAA).

### **5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA ETAPA I – TAXA DE FILTRAÇÃO DE 455,3 M<sup>3</sup>/M<sup>2</sup>.D**

Nos estudos experimentais da Etapa I foi utilizada a água clarificada, bombeada do filtro número 15 para um reservatório de equalização que, em seguida, direcionava por gravidade a água clarificada para um pequeno reservatório de nível constante, para o controle das vazões de alimentação dos filtros FA e FAA, que operavam em paralelo.

Uma vez que os filtros operavam em paralelo e com a mesma água de alimentação, para que possa haver comparação entre os filtros deve-se analisar o comportamento das taxas de aplicação ao longo do desenvolvimento da carreira de filtração em cada filtro.

A Figura 5.1 exibe a representação gráfica da distribuição dos valores de tendência central e das medidas de dispersão para os valores de taxa de filtração aferidos durante a realização dos experimentos, quando os registros de alimentação foram calibrados para fornecer uma taxa de aplicação de  $455,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ .

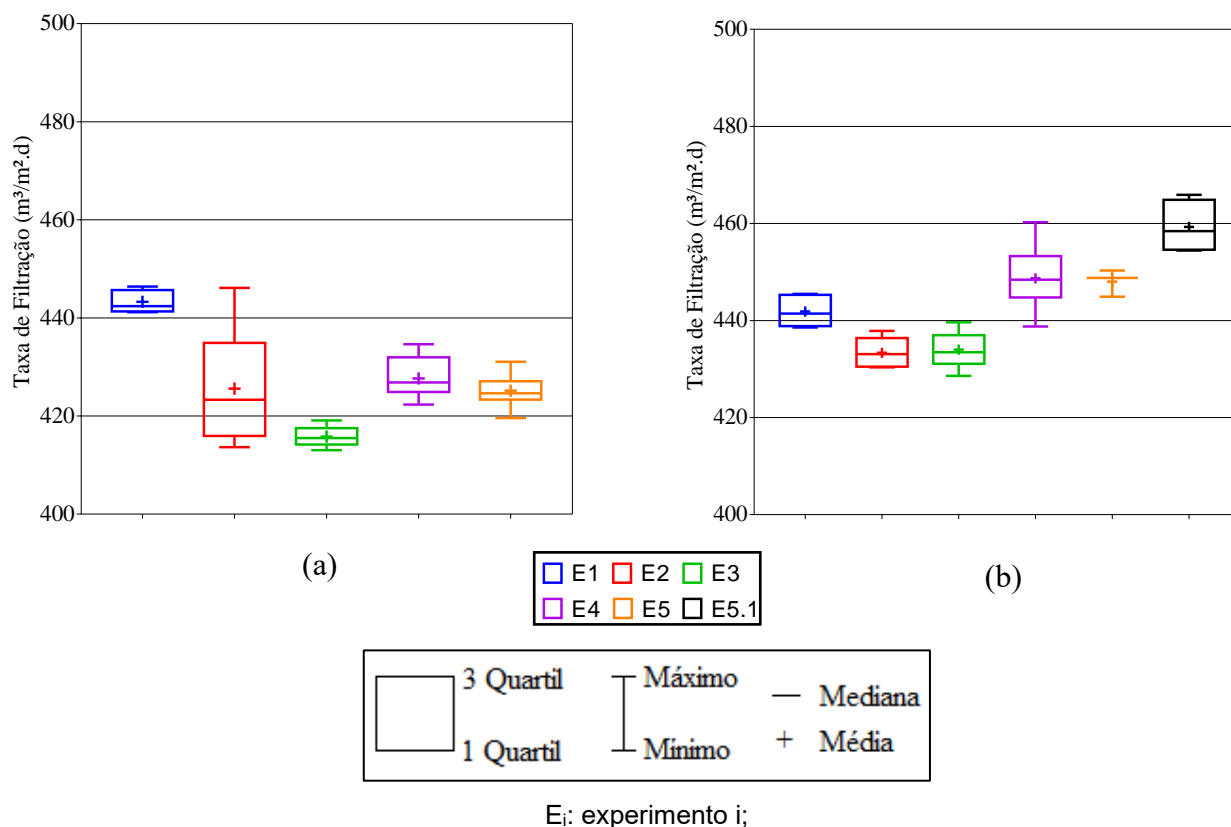


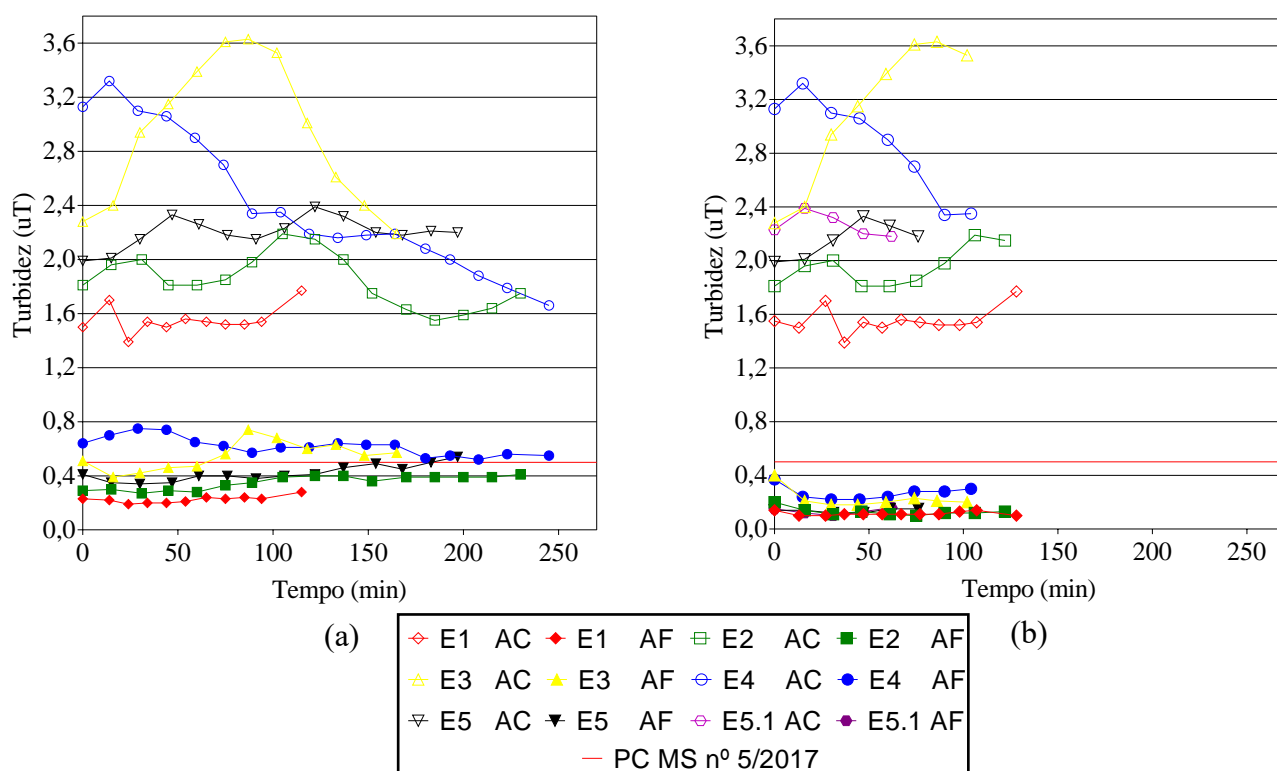
Figura 5.1 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de  $455,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

A partir da Figura 5.1, percebe-se que as taxas de filtração para um mesmo filtro apresentaram variações em cada experimento, fato que pode comprometer a comparação entre os dados, caso seja significativa a alteração da taxa de filtração.

Além disso, a Figura 5.1 também mostra que a partir do experimento E3 os valores de taxa em cada filtro para um mesmo experimento passaram a apresentar maiores diferenças, ou seja, a diferença de taxa no filtro FA e FAA em um mesmo experimento foi maior a partir do experimento E3. Desta forma, a influência da taxa de filtração também pode ser expressiva ao se comparar os resultados entre os filtros FA e FAA obtidos nos experimentos E3 a E5.

Conforme mencionado no Capítulo 4, os registros de controle de vazão de alimentação dos filtros foram calibrados para fornecer as vazões desejada. Entretanto, pode ocorrer o depósito de impurezas nos registros, modificando a seção de escoamento e, por conseguinte, a taxa de aplicação.

A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos nos experimentos de filtração nos filtros FA e FAA para o comportamento da turbidez ao longo da carreira de filtração.



AC: água coagulada; AF: água filtrada; PC: Portaria de consolidação nº 5/2017, anexo XX.

Figura 5.2 –Turbidez ao longo das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

Para melhor compreensão dos resultados dos experimentos da Etapa I, a representação gráfica da distribuição dos valores de tendência central e das medidas de dispersão para os valores de turbidez a montante e a jusante dos filtros em cada experimento são apresentadas na Figura 5.3.

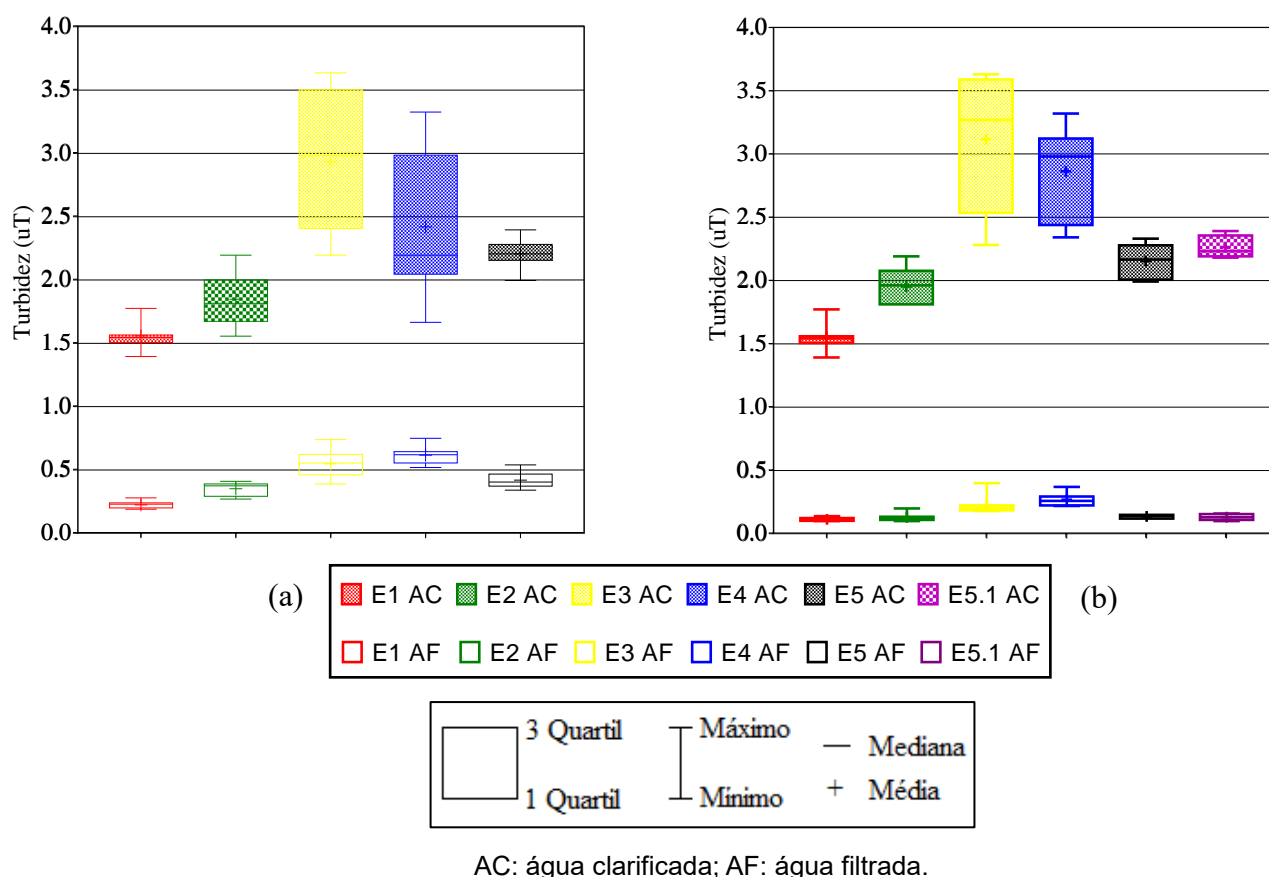


Figura 5.3 – Comparação entre a turbidez inicial e residual nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de  $455,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

Percebe-se na Figura 5.3 que a turbidez da água clarificada possui influência direta na turbidez da água filtrada, uma vez que o aumento dos valores de turbidez afluyente ao filtro acarretou no aumento da turbidez na água filtrada. Nota-se ainda que a turbidez da água de alimentação dos filtros apresentou valores mais dispersos que os valores de turbidez da água filtrada, como pode ser visto claramente nos experimentos E3 e E4, Figura 5.3. Este fato ocorre devido ao efeito de amortecimento dos filtros, que consegue absorver as variações da turbidez da água de alimentação, produzindo água com valores de turbidez com menor amplitude de variação.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os valores médios e o desvio padrão dos seguintes parâmetros: cor aparente e turbidez da água bruta (AB) e a turbidez da água clarificada (AC) monitorados na ETA Brasília e também da água clarificada (AC) e filtrada (AF) nos filtros piloto testados, FA e FAA, respectivamente.

Tabela 5.1 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FA.

Experimento	ETA				Piloto		
	n	Cor Apar. AB (uT)	Turbidez AB (uT)	Turbidez AC Ímpar (uT)	n	Turbidez AC (uT)	Turbidez AF (uT)
E1	4	29,29 ± 3,20	6,93 ± 0,75	1,53 ± 0,12	11	1,55 ± 0,10	0,22 ± 0,03
E2	6	26,83 ± 2,79	6,03 ± 0,55	2,15 ± 0,60	16	1,84 ± 0,19	0,35 ± 0,05
E3	5	28,00 ± 3,08	7,08 ± 0,97	2,62 ± 0,79	12	2,93 ± 0,54	0,55 ± 0,10
E4	6	27,83 ± 3,92	6,72 ± 1,46	2,43 ± 0,93	17	2,41 ± 0,52	0,62 ± 0,07
E5	6	28,00 ± 1,79	5,82 ± 0,44	2,17 ± 0,27	14	2,20 ± 0,11	0,42 ± 0,06

AB: água bruta, AC: água clarificada.

Tabela 5.2 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FAA.

Experimento	ETA				Piloto		
	n	Cor Apar. AB (uT)	Turbidez AB (uT)	Turbidez AC Ímpar (uT)	n	Turbidez AC (uT)	Turbidez AF (uT)
E1	4	29,25 ± 3,20	6,93 ± 0,75	1,53 ± 0,12	12	1,55 ± 0,10	0,11 ± 0,01
E2	4	27,75 ± 3,10	6,17 ± 0,64	2,14 ± 0,57	9	1,95 ± 0,15	0,13 ± 0,03
E3	4	28,50 ± 3,32	6,92 ± 1,05	2,69 ± 0,89	8	3,12 ± 0,53	0,23 ± 0,07
E4	4	29,00 ± 2,58	7,18 ± 1,63	2,80 ± 0,94	8	2,86 ± 0,37	0,27 ± 0,05
E5	4	28,00 ± 2,16	5,85 ± 0,51	2,23 ± 0,20	6	2,15 ± 0,13	0,14 ± 0,01
E5.1	3	27,33 ± 1,53	5,67 ± 0,35	2,36 ± 0,14	5	2,26 ± 0,09	0,13 ± 0,02

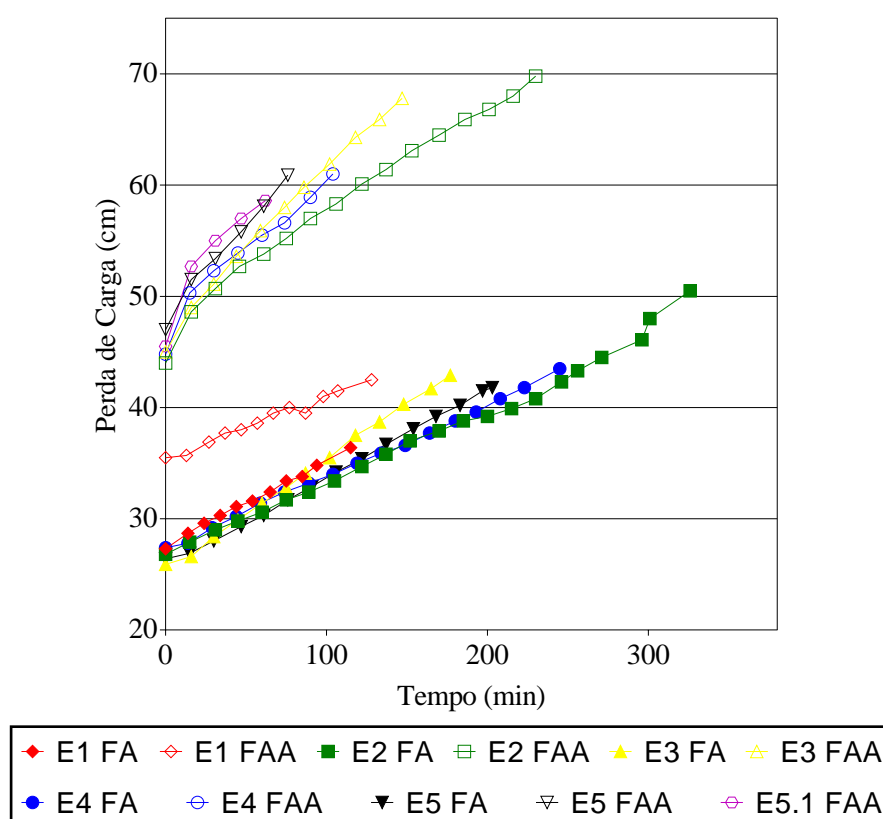
AB: água bruta, AC: água clarificada.

Apesar de os filtros de areia FA e de antracito e areia FAA operarem em paralelo, os valores de turbidez da água clarificada monitorada na instalação piloto e na ETA apresentam pequenas variações, já que a média dos valores leva em conta a duração da carreira de filtração, que foi diferente em cada filtro.

A partir da Figura 5.2 e das Tabelas 5.1 e 5.2, pode-se afirmar que ambos os filtros apresentaram bom desempenho na remoção de turbidez. Entretanto, o filtro de antracito e areia FAA apresentou turbidez residual sempre inferior a 0,5 uT em todos os ensaios, fato não observado no filtro de areia FA.

Para o filtro de areia FA, foram observados valores de turbidez superior a 0,5 uT em 66,67% do tempo monitorado no experimento E3, 100% no experimento E4 e 7,14% no experimento E5. Ressalta-se que no experimento E5 a turbidez residual na água filtrada só superou o valor de 0,5 uT no final da carreira de filtração.

Como os filtros apresentaram comportamentos diferentes com relação à remoção de turbidez e à colmatação do meio filtrante, o acréscimo de perda de carga ao longo do tempo em cada filtro também ocorre de maneira diferenciada. A partir das curvas de perda de carga total (Figura 5.4) para cada experimento foi possível determinar a duração das respectivas carreiras de filtração na instalação piloto.



Ei: experimento i; FA: filtro de areia; FAA: filtro de areia e antracito.

Figura 5.4 – Comportamento da perda de carga nos experimentos da Etapa I (taxa de filtração de  $455,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação clarificada).

Os conjuntos de curvas de perdas de carga para os filtros de areia FA e de antracito e areia FAA apresentaram bastante similaridade entre si, com exceção do experimento E1 FAA, no qual o desenvolvimento da perda de carga foi bastante diferente dos demais ensaios. Tal fato indica que as alterações de turbidez e de taxa de filtração em cada ensaio não influenciaram

significativamente os experimentos.

Neste sentido, além da própria granulometria do meio filtrante, a perda de carga e, por conseguinte, a duração da carreira de filtração pode ter sido influenciada por outros fatores, destaca-se entre eles a coagulação química.

Na Tabela 5.3, são apresentados os percentuais de contribuição de cada manancial de captação e os valores de dosagem de coagulante (PAC) utilizados na ETA durante a realização dos experimentos, bem como os valores de duração das carreiras de filtração obtida na instalação piloto.

Tabela 5.3 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada).

<b>Experimento</b>	<b>Manancial</b>	<b>Dose de PAC (mg/L)</b>	<b>Carreira de Filtração FA (min)</b>	<b>Carreira de Filtração FAA (min)</b>
<b>E1</b>	29% BN; 61% TR; 10% SM	7	191,70	267,63
<b>E2</b>	32% BN; 68% TR; 0% SM	7	226,14	116,54
<b>E3</b>	32% BN; 68% TR; 0% SM	5	154,57	89,65
<b>E4</b>	32% BN; 68% TR; 0% SM	5 – 7 *	232,04	92,73
<b>E5</b>	32% BN; 68% TR; 0% SM	7 – 6*	196,16	81,58
<b>E5.1</b>	32% BN; 68% TR; 0% SM	6	nr	64,87

nr: experimento não realizado; \* Alteração do pH de coagulação durante a operação dos filtros piloto; BN: córrego Bananal; TR: ribeirão do Tordo; SM: reservatório Santa Maria.

Ainda com relação ao efeito da coagulação sobre o desempenho da filtração, nota-se na Tabela 5.3 que o principal fator que diferencia o experimento E1 FAA dos demais experimentos para este filtro é a composição da água bruta durante a realização do experimento. Durante a realização do experimento E1 FAA, a ETA estava recebendo cerca de 10% da vazão de entrada proveniente do reservatório Santa Maria.

A água proveniente do reservatório Santa Maria possui baixa turbidez mineral e presença de algas (Guimarães, 2007), sendo indicada para o tratamento em ciclo completo com flotação por ar dissolvido (Bof, 2007; Centurione Filho, 2002; entre outros). Desta forma, parece que a fração de água proveniente deste reservatório contribuiu para melhorar as condições de coagulação. Este fato pode ser observado na Tabela 5.2, que mostra que apesar de a água bruta afluente a ETA durante a realização do experimento E1 FAA apresentar o maior valor de cor aparente, também apresenta o melhor valor de água clarificada.

Ressalta-se ainda que a desestabilização das partículas de impurezas favorece também os mecanismos de aderência, facilitando que as partículas sejam capturadas e aderidas na superfície dos grãos coletores do meio filtrante ou nas partículas previamente aderidas (Di Bernardo e Dantas, 2005). Este efeito também pode ser observado na Tabela 5.2, uma vez que o experimento E1 FAA foi o que apresentou menor turbidez residual na água filtrada.

Já o experimento E1 FA, que foi conduzido em paralelo ao experimento E1 FAA, em condições similares com relação à taxa de aplicação, apesar de não ter apresentado a maior duração de carreira de filtração para o filtro FA nos experimentos da Etapa I, apresentou, assim como o FAA, o menor valor de turbidez residual, indicando então a melhor desestabilização das partículas de impurezas.

Ressalta-se que os valores médios de turbidez residual nos experimentos E1 FA e E1 FAA podem ser maiores, uma vez que tais experimentos não chegaram ao fim da duração estimada para as respectivas carreiras de filtração, por motivos relacionados à operação da ETA. Desta forma, o não acompanhamento dos valores de turbidez, que tendem a aumentar ao longo da carreira de filtração, pode ter contribuído para a redução dos valores médios observados nos experimentos E1 FA e E1 FAA.

De modo geral, o filtro de antracito e areia FAA apresentou melhor desempenho de remoção de turbidez e, por isso, também apresentou menor duração das carreiras de filtração na instalação piloto, devido ao maior acréscimo de perda de carga por colmatção do meio filtrante, variando de 64 a 267 minutos.

A maior duração de carreira de filtração para o filtro de areia FA foi obtida no experimento E2 FA, com duração de 226 minutos. Neste teste, durante a carreira de filtração, a turbidez



residual não ultrapassou o limite de 0,5 uT. Já no ensaio E5 FA, nota-se o início da elevação da turbidez remanescente no final da carreira de filtração, superando o valor de 0,5 uT a partir dos últimos 15 min finais.

Já o experimento E4 FA, mostrou diferenças relacionadas à turbidez da água filtrada, em comparação com os demais experimentos no filtro de areia FA. Neste ensaio observou-se, desde o início da carreira de filtração, turbidez residual superior a 0,5 uT. Provavelmente este fato é decorrente da piora da qualidade da água clarificada, conforme apresenta a Figura 5.2, que pode ser decorrente da chuva que ocorreu na ETA no horário de realização do ensaio ou de problemas na coagulação, já que após a alteração da dosagem de coagulante (Tabela 5.3) os valores de turbidez da água clarificada foram reduzidos. Cabe ressaltar que nos momentos de chuva na ETA ocorre uma piora momentânea da água clarificada, com o aumento da turbidez, já que os flotores não possuem cobertura.

Para um água com turbidez variando entre 1,39 e 3,63 uT e com taxa de aplicação média de 427,50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d para o FA e de 441,19 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d para o FAA, foi aplicada a metodologia de Di Bernardo e Teixeira (1991, apud Di Bernardo, 1993) para estimar a duração da carreira de filtração da ETA em escala real, operando com taxa declinante de filtração (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Duração das carreiras de filtração estimadas para a ETA operando em taxa declinante variável na Etapa I (taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada).

<b>Experimento</b>	<b>FA (horas)</b>	<b>FAA (horas)</b>
<b>E1</b>	38,34	53,53
<b>E2</b>	45,23	23,31
<b>E3</b>	30,91	17,93
<b>E4</b>	46,41	18,55
<b>E5</b>	39,23	16,32
<b>E5.1</b>	nr	12,97

nr: não realizado.

Assim, o filtro de areia FA apresentou duração de carreira de filtração média de 40,02 ± 6,21 horas e o filtro de antracito e areia FAA de 23,77 ± 14,96 horas. Percebe-se então que a carreira de filtração do filtro FAA apresentou menor duração e maior variação, em função

possivelmente das variações da taxa de filtração observadas a partir do experimento E3 no filtro piloto FAA.

Em seguida, a taxa de aplicação foi alterada para  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ , dando-se início a Etapa II de experimentos.

## 5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA ETAPA II, TAXA DE FILTRAÇÃO DE $361,73 \text{ M}^3/\text{M}^2.\text{D}$

Os primeiros experimentos da Etapa II, com taxa de aplicação de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ , menor que a taxa utilizada da Etapa I, foram realizados ainda com a água clarificada.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos, foram analisadas primeiramente as distribuições estatísticas dos valores da taxa de filtração. A Figura 5.5 exibe a representação gráfica da distribuição dos valores de tendência central e das medidas de dispersão para os valores de taxa de filtração em cada filtro estudado.

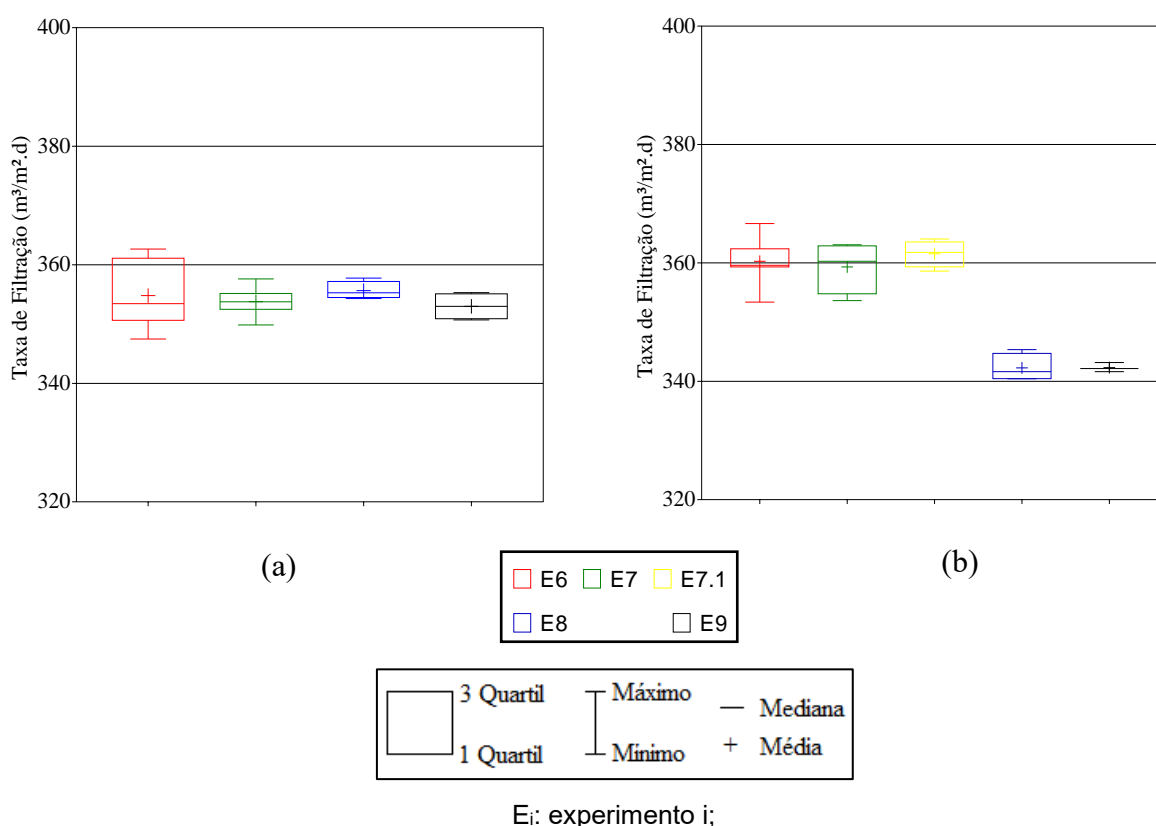
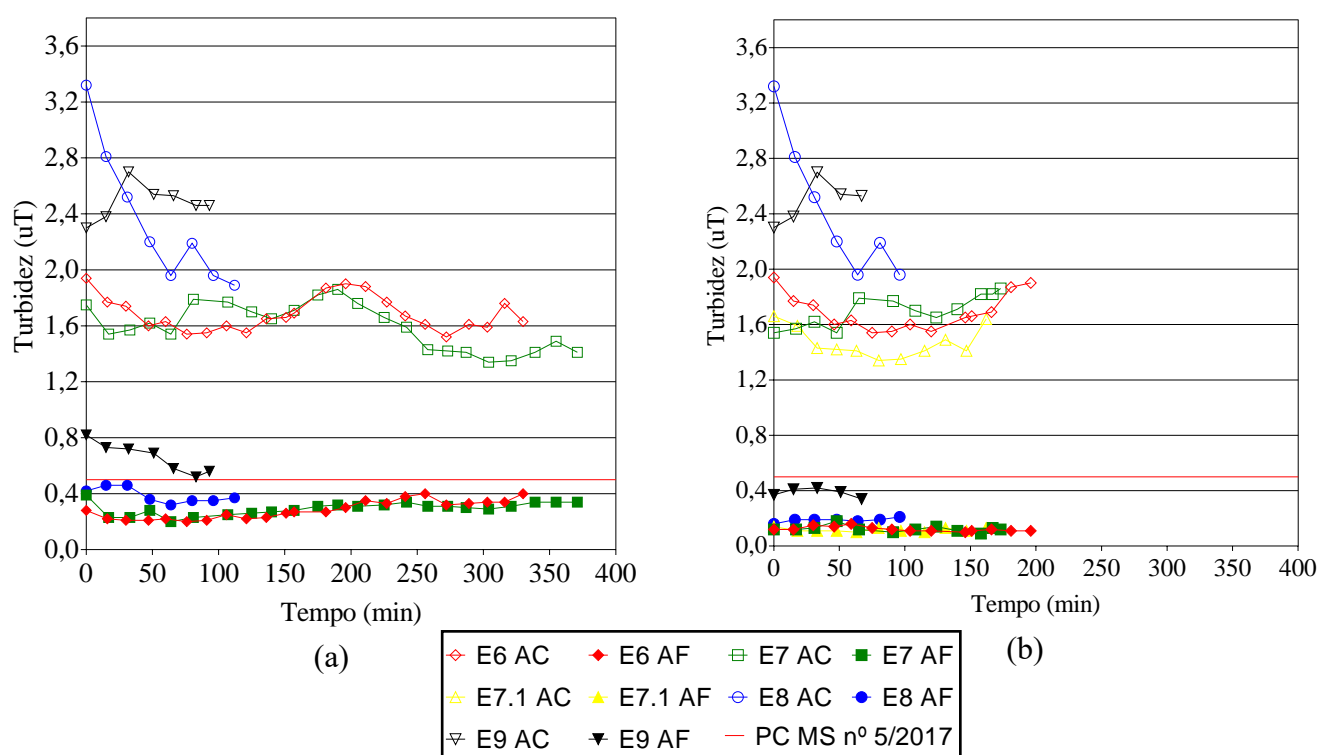


Figura 5.5 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

A partir da Figura 5.5 nota-se que a taxa de aplicação variou ao longo dos ensaios, mas os valores médios se mantiveram próximos nos experimentos equivalentes realizados no filtro de areia FA e no filtro de antracito e areia FAA, com exceção dos experimentos E8 e E9 no filtro FAA. Esta modificação da taxa de filtração pode ter ocorrido devido ao acúmulo de impurezas no registro de alimentação do filtro que alterou a calibração das vazões.

Como os experimentos E6 e E7 foram realizados sob condições similares em relação à taxa de filtração, os resultados destes experimentos podem ser comparados sem que haja grandes interferências relacionadas às variações da taxa de aplicação.

A Figura 5.6 apresenta o comportamento da turbidez para os experimentos de filtração nos filtros de areia FA e de antracito e areia FAA, para a Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada).



AC: água coagulada; AF: água filtrada; PC: Portaria de consolidação nº 5/2017, anexo XX.

Figura 5.6 –Turbidez ao longo das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

A distribuição dos valores de tendência central e das medidas de dispersão para os valores de turbidez na água clarificada e filtrada na instalação piloto para os experimentos da Etapa II, com água clarificada, são apresentados na Figura 5.7.

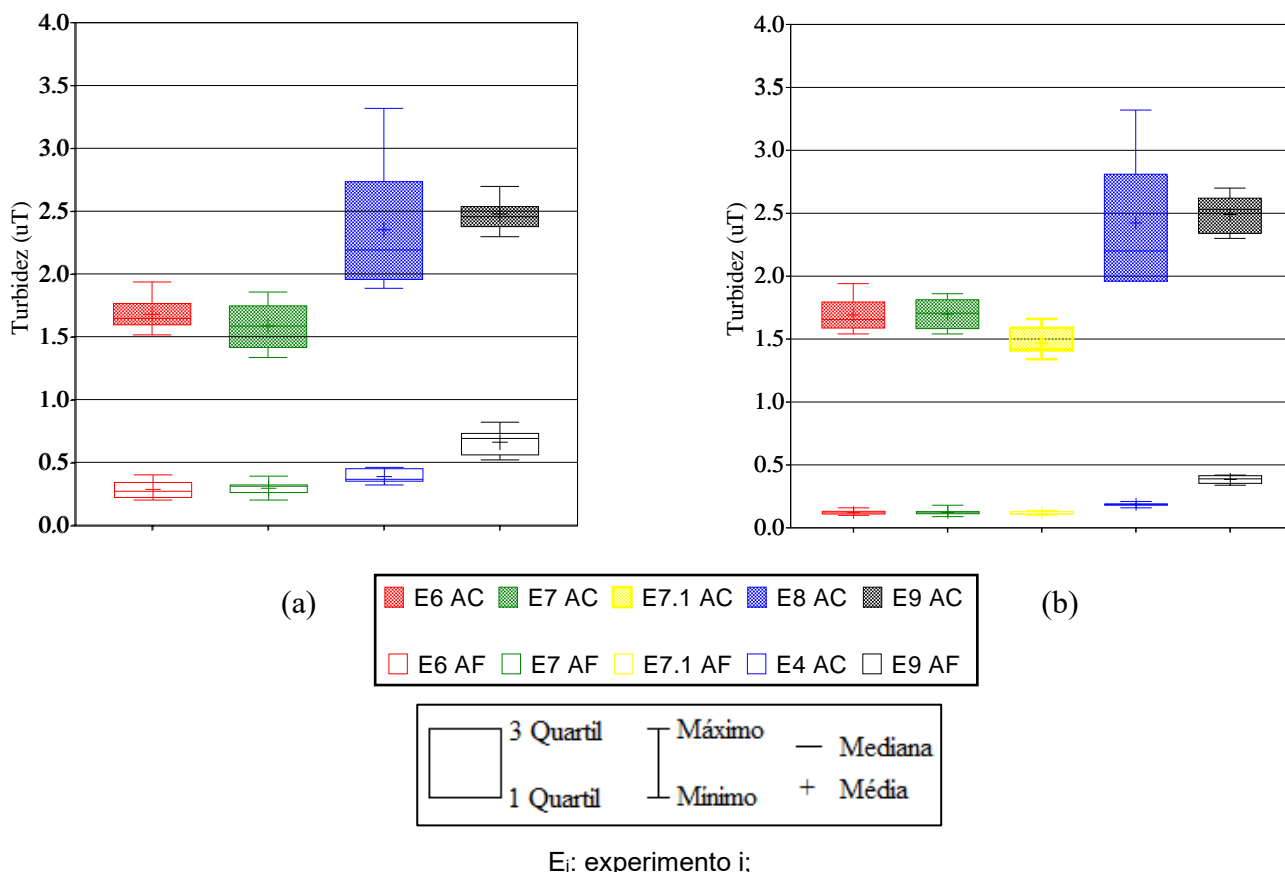


Figura 5.7 – Comparação entre a turbidez inicial e residual nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

Assim como os resultados obtidos na Etapa I, os resultados obtidos na Etapa II e apresentados na Figura 5.7 mostram a influência direta da turbidez afluyente ao filtro na turbidez da água filtrada e também o efeito do filtro de amortecimento da turbidez afluyente.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os valores médios e o desvio padrão dos seguintes parâmetros: cor aparente e turbidez da água bruta (AB) e a turbidez da água clarificada (AC) monitorados na ETA Brasília e também da água clarificada (AC) e filtrada (AF) nos filtros piloto testados, FA e FAA, respectivamente.

Tabela 5.5 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FA.

Experimento	ETA				Piloto		
	n	Cor Apar. AB (uT)	Turbidez AB (uT)	Turbidez AC Ímpar (uT)	n	Turbidez AC (uT)	Turbidez AF(uT)
E6	7	28,00 ± 2,71	6,19 ± 0,76	1,50 ± 0,18	23	1,68 ± 0,12	0,28 ± 0,07
E7	8	26,13 ± 4,12	5,37 ± 0,46	1,42 ± 0,23	23	1,59 ± 0,16	0,29 ± 0,05
E8	3	53,33 ± 0,58	14,26 ± 0,56	1,79 ± 0,20	8	2,36 ± 0,50	0,39 ± 0,05
E9	4	55,25 ± 5,91	14,11 ± 1,26	1,81 ± 0,16	7	2,48 ± 0,13	0,66 ± 0,11

AB: água bruta, AC: água clarificada.

Tabela 5.6 – Valores médios dos parâmetros cor aparente e turbidez da água bruta, clarificada e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada), no filtro de areia FAA.

Experimento	ETA				Piloto		
	n	Cor Apar. AB (uT)	Turbidez AB (uT)	Turbidez AC Ímpar (uT)	n	Turbidez AC (uT)	Turbidez AF (uT)
E6	5	26,80 ± 2,05	5,80 ± 0,42	1,56 ± 0,19	14	1,69 ± 0,13	0,12 ± 0,02
E7	5	25,80 ± 4,27	5,31 ± 0,45	1,53 ± 0,22	12	1,70 ± 0,11	0,12 ± 0,02
E7.1	4	26,00 ± 4,08	5,40 ± 0,48	1,27 ± 0,11	11	1,47 ± 0,11	0,12 ± 0,01
E8	3	53,33 ± 0,58	14,26 ± 0,56	1,79 ± 0,20	7	2,42 ± 0,50	0,19 ± 0,01
E9	3	56,00 ± 7,00	14,40 ± 1,38	1,75 ± 0,13	5	2,49 ± 0,16	0,39 ± 0,03

AB: água bruta, AC: água clarificada.

A partir da Figura 5.7 e das Tabelas 5.5 e 5.6, pode-se afirmar que ambos os filtros também apresentaram bom desempenho na remoção de turbidez com a redução da taxa de aplicação. O filtro de antracito e areia FAA novamente apresentou turbidez residual sempre inferior a 0,5 uT em todos os ensaios. O filtro de areia FA, com exceção do experimento E9, também produziu água com turbidez residual inferior a 0,5 uT durante as respectivas carreiras de filtração.

Destaca-se que os valores de turbidez remanescentes no filtro FA foram menores na Etapa II, com relação a Etapa I. Desta forma, nota-se que a redução da taxa de filtração acarretou em uma água filtrada de melhor qualidade, uma vez que as forças de cisalhamento são menores, em função da menor taxa de aplicação, reduzindo os fenômenos de desprendimento

e transpasse. Além disso, ressalta-se que a redução de taxa de aplicação e da consequente redução da velocidade intersticial favorecem os mecanismos transporte, proporcionado que as partículas de impurezas possam colidir com os grãos do meio filtrante.

Tais diferenças observadas nas remoções de turbidez nos filtros resultam em curvas de perda de carga também distintas. As curvas de perda de carga obtidas nos experimentos da Etapa II, com água clarificada são apresentadas na Figura 5.8.

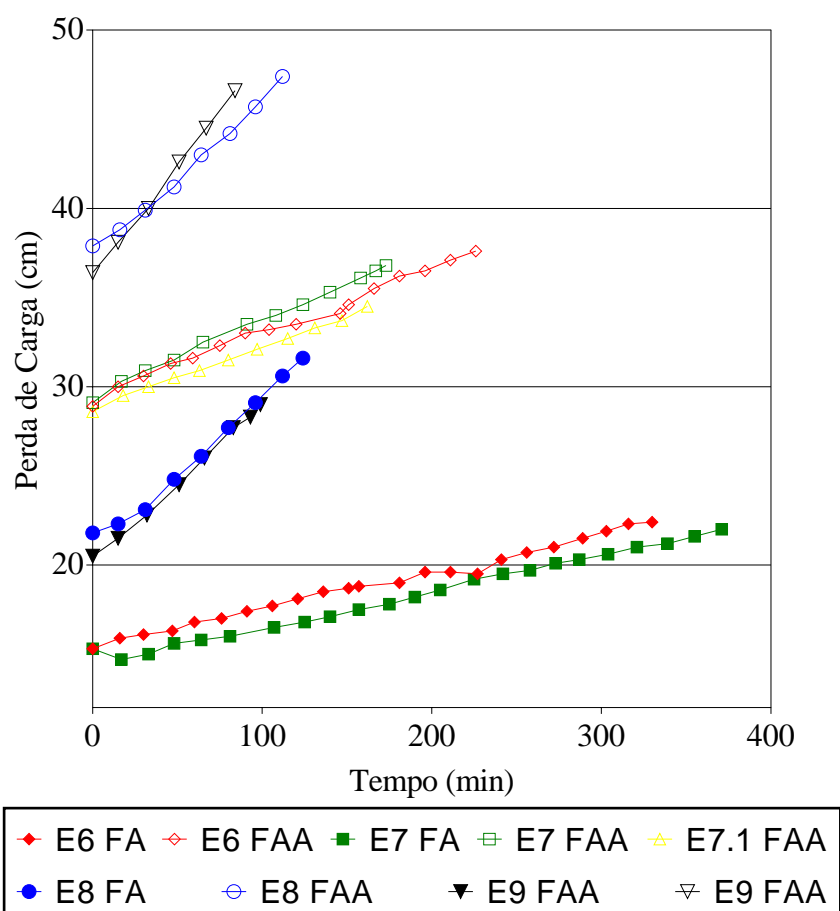


Figura 5.8 – Comportamento da perda de carga nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação clarificada).

Conforme apresentado na Figura 5.8, os experimentos E6 e E7 apresentaram comportamento similar com relação à evolução da perda de carga em cada filtro, entretanto destoaram do comportamento dos experimentos E8 e E9, que também apresentaram similaridade entre a com relação a evolução da perda de carga nos filtros de cada experimento.

Na Tabela 5.7 são apresentadas as porcentagens de contribuição de cada manancial de captação, as dosagens de coagulante utilizadas na estação durante a realização dos experimentos E6 a E9 e as durações das respectivas carreiras de filtração nos filtros piloto.

Tabela 5.7 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada).

Experimento	Manancial	Dose de PAC (mg/L)	Carreira de Filtração FA (min)	Carreira de Filtração FAA (min)
E6	32% BN; 68% TR; 0% SM	6	360,00	196,09
E7	32% BN; 68% TR; 0% SM	6	420,95	175,90
E7.1	26% BN; 74% TR; 0% SM	6	nr	214,94
E8	0% BN; 67% TR; 33% SM	6	111,01	93,78
E9	0% BN; 67% TR; 33% SM	6	89,83	63,15

nr: não realizado; BN: córrego Bananal; TR: ribeirão do Tordo; SM: reservatório Santa Maria.

O que diferenciou os experimentos E6 e E7 dos experimentos E8 e E9, conforme é mostrado na Tabela 5.7, foram principalmente as contribuições de cada manancial de captação. Nos dois primeiros experimentos a ETA estava recebendo água do córrego Bananal e do ribeirão do Tordo. Já nos dois últimos experimentos a ETA passou a receber a água bruta do ribeirão do Tordo e do reservatório Santa Maria e apresentou a elevação notável de cor aparente e da turbidez. A elevação dos valores destes parâmetros refletiu na piora da qualidade da água clarificada na estação (Tabelas 5.5 e 5.6).

Uma hipótese para o menor desempenho (menor duração de carreira de filtração e água filtrada com valores de turbidez mais elevados) dos filtros piloto nos ensaios E8 e E9 é que as condições de coagulação não tenham sido otimizadas para a composição da água bruta. Apesar deste efeito negativo sobre os filtros, o filtro FAA conseguiu reter as impurezas, apresentando turbidez da água filtrada sempre inferior a 0,5 uT.

Como mencionado anteriormente, o filtro de areia FA apresentou bons resultados, entretanto, no experimento E9 a turbidez durante toda a carreira de filtração foi superior a 0,5 uT e

inferior a 1 uT. Portanto, não atendendo as exigências da Portaria de Consolidação do MS nº 5/2017, anexo XX.

Desta forma, para água com turbidez variando entre 1,34 e 3,32 uT e com taxa média de aplicação no filtro de areia FA de 356, 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e de 350, 98 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d no filtro de antracito e areia FAA, foi aplicada a metodologia de Di Bernardo e Teixeira (1991, apud Di Bernardo, 1993) para estimar a duração da carreira de filtração da ETA em escala real, operando com taxa declinante de filtração (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Duração das carreiras de filtração estimadas para a ETA operando em taxa declinante variável na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação clarificada).

<b>Experimento</b>	<b>FA (horas)</b>	<b>FAA (horas)</b>
<b>E6</b>	72,00	39,22
<b>E7</b>	84,19	35,18
<b>E7.1</b>	nr	42,99
<b>E8</b>	22,20	18,76
<b>E9</b>	17,97	12,63

nr: não realizado.

Assim, o filtro de areia FA apresentou duração de carreira de filtração média de 49,09 ± 33, 91 horas e o filtro de antracito e areia FAA de 29,75 ± 13,71 horas. Percebe-se então que a carreira de filtração do filtro FAA apresentou menor duração, porém as carreias do filtro FA apresentam maior variação.

Em seguida, a taxa de aplicação foi mantida em 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e foi utilizada a água floculada para a alimentação dos filtros. A água floculada, foi bombeada do canal de água floculada para um reservatório de equalização. A água do reservatório de equalização era então encaminhada por gravidade para um pequeno reservatório de nível constante para o controle das vazões de alimentação dos filtros FA e FAA, que operavam em paralelo.

Diferentemente da água clarificada utilizada na Etapa I, a água floculada utilizada na Etapa II apresenta flocos grandes e, por isso, a fim de se compreender melhor o efeito do bombeamento sobre tamanho dos flocos foram analisadas, por microscopia, amostras de água



antes e depois do bombeamento. A Figura 5.9 ilustra a aparência física dos agregados presentes na água floculada antes e após o bombeamento.

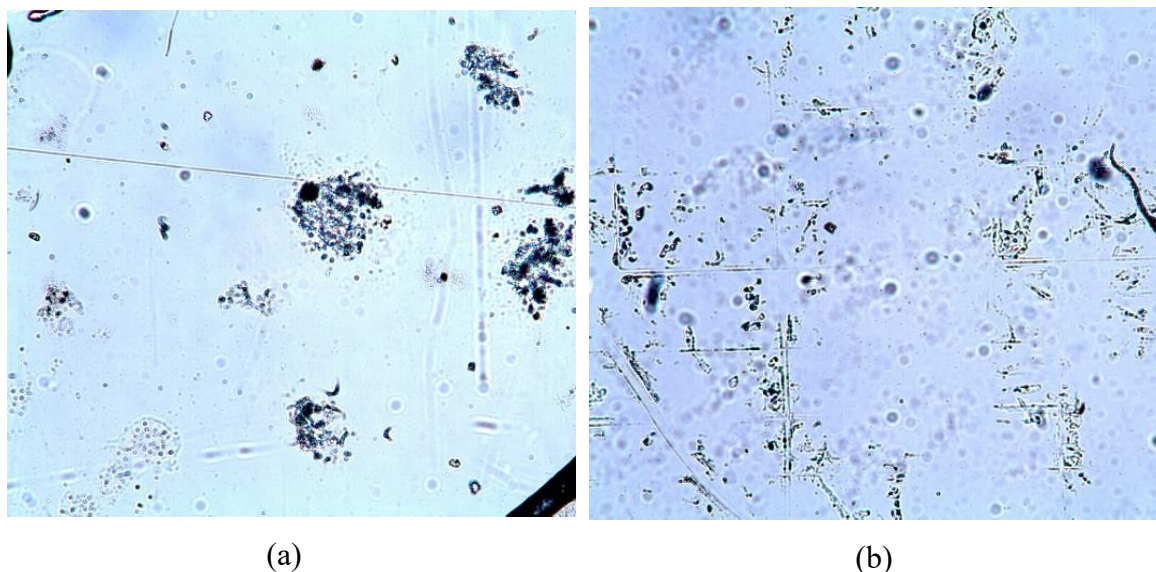


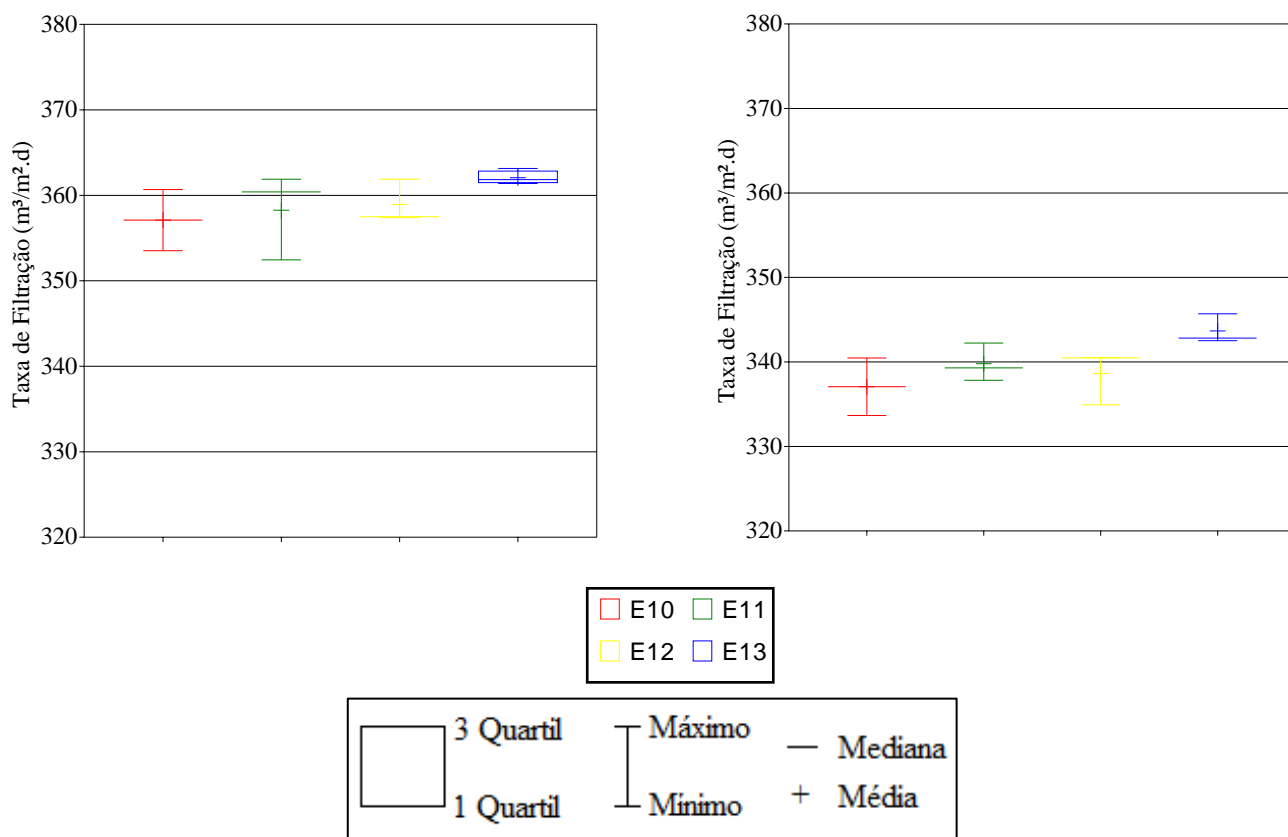
Figura 5.9 – Análise dos flocos na água coagulada com aumento de 50 x: (a) antes do bombeamento e (b) após o bombeamento.

A Figura 5.9 (a) mostra os flocos presentes na água na saída do floculador, nela pode-se observar a presença de flocos grandes de aglomerados minerais. Já na Figura 5.9 (b), não foi observado a presença concreta de flocos após o bombeamento.

Ressalta-se que como a utilização da água floculada para alimentação dos filtros teve o objetivo de simular uma situação de água clarificada com turbidez mais elevada, o bombeamento promoveu a redução do tamanho dos flocos, contribuindo para simular a água clarificada com maior nível de turbidez, que não apresenta flocos grandes.

Antes de se comparar os dados dos experimentos da Etapa II com a água floculada, inicialmente foi analisado o comportamento das taxas de filtração ao longo das carreiras de filtração, Figura 5.10.

A partir da Figura 5.10 nota-se que as taxas de filtração variaram faixas de valores similares em cada filtro durante os experimentos, mas se mantiveram em faixas de valores diferentes entre os experimentos dos filtros FA e FAA. Deste modo, a comparação entre os filtros pode não ser representativa devido à influência da taxa de filtração.



E<sub>i</sub>: experimento i;

Figura 5.10 – Comparação das taxas de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de antracito e areia FAA.

Os resultados do comportamento da turbidez da água de alimentação ao longo das carreias de filtração para os experimentos obtidos na Etapa II, com água floculada, são exibidos na Figura 5.11.

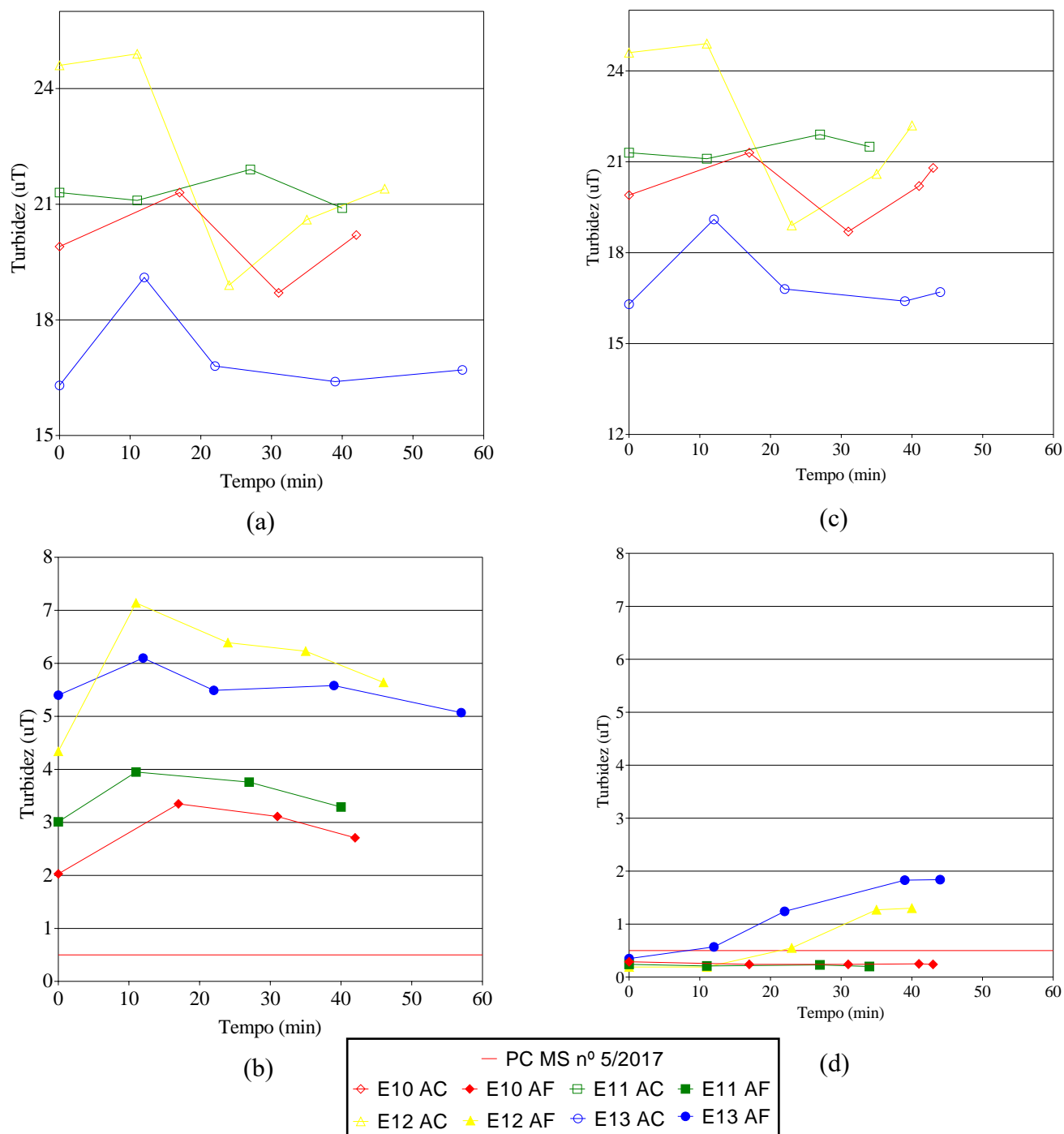


Figura 5.11 – Turbidez ao longo da duração das carreiras de filtração nos experimentos da Etapa II (taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA, água de alimentação; (b) filtro de areia FA, água filtrada e (c) filtro de areia e antracito FAA, água de alimentação; e (d) filtro de areia e antracito FAA, água filtrada.

A distribuição dos valores de tendência central e das medidas de dispersão para o parâmetro de turbidez na água de alimentação e filtrada na instalação para os experimentos da Etapa II, com água floculada, são apresentados na Figura 5.12.

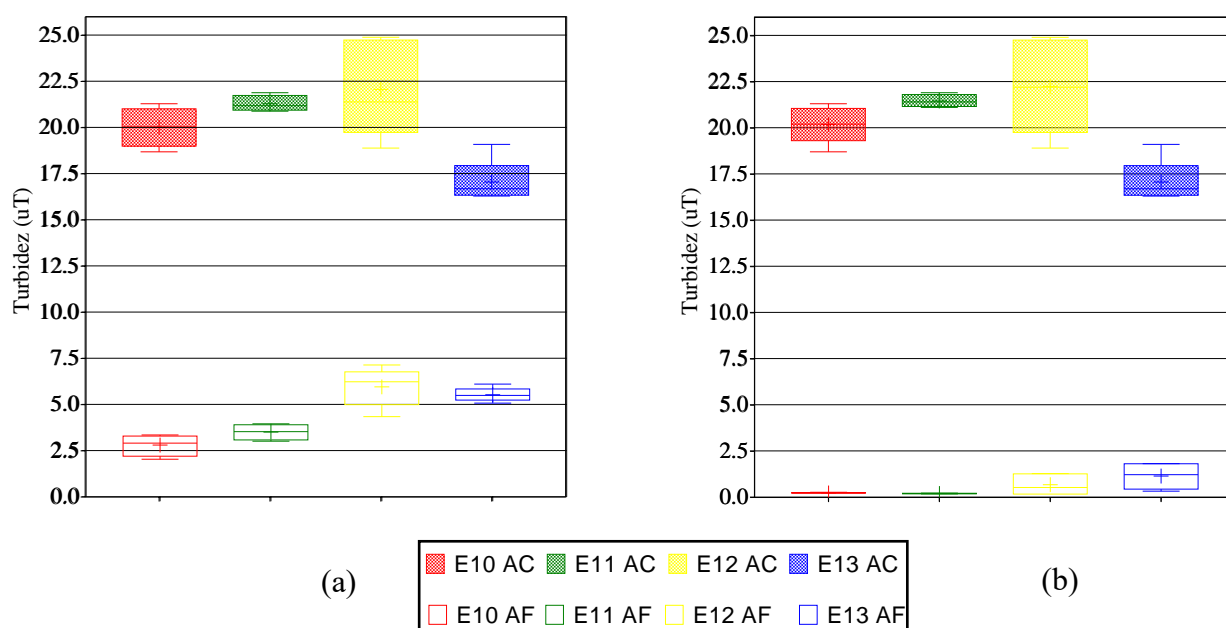


Figura 5.12 – Comparação da remoção de turbidez, na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação floculada): (a) filtro de areia FA e (b) filtro de areia e antracito FAA.

Diferentemente dos experimentos anteriores com água clarificada, tanto na Etapa I com taxa de filtração de 455,30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d quanto na Etapa II com taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, os resultados obtidos na Etapa II com água floculada não apresenta uma relação tão clara entre a turbidez da água de alimentação e da água filtrada.

Como os experimentos da Etapa II tiveram durações de carreira de filtração próximas, não houve diferenças nas médias calculadas para os parâmetros de cor aparente e turbidez da água bruta monitora na ETA, conforme é apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores médios da cor aparente e turbidez da água bruta (AB) e de turbidez da água clarificada (AC) monitorados na ETA durante os experimentos da Etapa II, (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação floculada).

Experimento	ETA			
	n	Cor Apar. AB (uT)	Turbidez AB (uT)	Turbidez AC Ímpar (uT)
<b>E10</b>	3	53,33 ± 4,16	14,00 ± 0,50	1,83 ± 0,32
<b>E11</b>	3	56,00 ± 6,08	14,10 ± 1,05	1,40 ± 0,16
<b>E12</b>	2	58,50 ± 6,36	13,55 ± 2,49	1,70 ± 0,39
<b>E13</b>	3	49,33 ± 4,51	11,36 ± 0,43	2,00 ± 0,08

AB: água bruta; AC: água clarificada.

Os resultados obtidos para a remoção de turbidez nos experimentos da Etapa II, com água de alimentação floculada obtidos nos filtros piloto são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores médios da turbidez da água de alimentação e filtrada na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação floculada), nos filtros de areia FA e de areia e antracito FAA.

Experimento	Filtro de areia FA		Filtro de antracito e Areia FAA	
	n	Turbidez AFI (uT)	Turbidez AF (uT)	Turbidez AF Piloto (uT)
<b>E10</b>	4	20,03 ± 1,07	2,80 ± 0,58	20,18 ± 0,99
<b>E11</b>	4	21,30 ± 0,43	3,50 ± 0,43	21,45 ± 0,34
<b>E12</b>	5	22,08 ± 2,60	5,95 ± 1,05	22,24 ± 2,57
<b>E13</b>	5	17,06 ± 1,16	5,53 ± 0,37	17,06 ± 1,16

AFI: água floculada; AF: água filtrada.

A partir da Figura 5.12 e da Tabela 5.10, nota-se que os experimentos E10 e E11 apresentaram grande semelhança quando se compara um mesmo filtro em cada experimento. Este mesmo comportamento foi observado nos Experimentos E12 e E13. Entretanto, os experimentos E10 e E11 se comportaram diferente dos experimentos E12 e E13.

Nos dois primeiros experimentos, E10 e E11, o filtro FAA conseguiu proporcionar turbidez residual menor que 0,5 uT, durante toda a carreira de filtração, mesmo com a água de alimentação com turbidez próxima de 20 uT. Já nos experimentos E12 e E13, o mesmo filtro apresentou um comportamento um pouco diferente: no início da carreira de filtração o filtro de areia e antracito FAA conseguiu reter a turbidez, produzindo água com turbidez residual menor que 0,5 uT, porém a turbidez superou o valor de 1 uT após 10 minutos do início da carreira de filtração.

Um comportamento similar também é apresentado no filtro de areia FA, no qual nos experimentos E10 e E11 a água filtrada apresenta valores de turbidez residual inferiores aos dos experimentos E12 e E13. Porém, em todos os experimentos com a água de alimentação floculada o filtro de areia FA produziu água com turbidez residual superior a 0,5 uT e superior aos valores do filtro de areia e antracito FAA.

Tais diferentes variação no comportamento dos experimentos podem ser analisadas também

a partir das curvas de perda de carga total dos experimentos da Etapa II, com água de alimentação floculada, apresentadas na Figura 5.13.

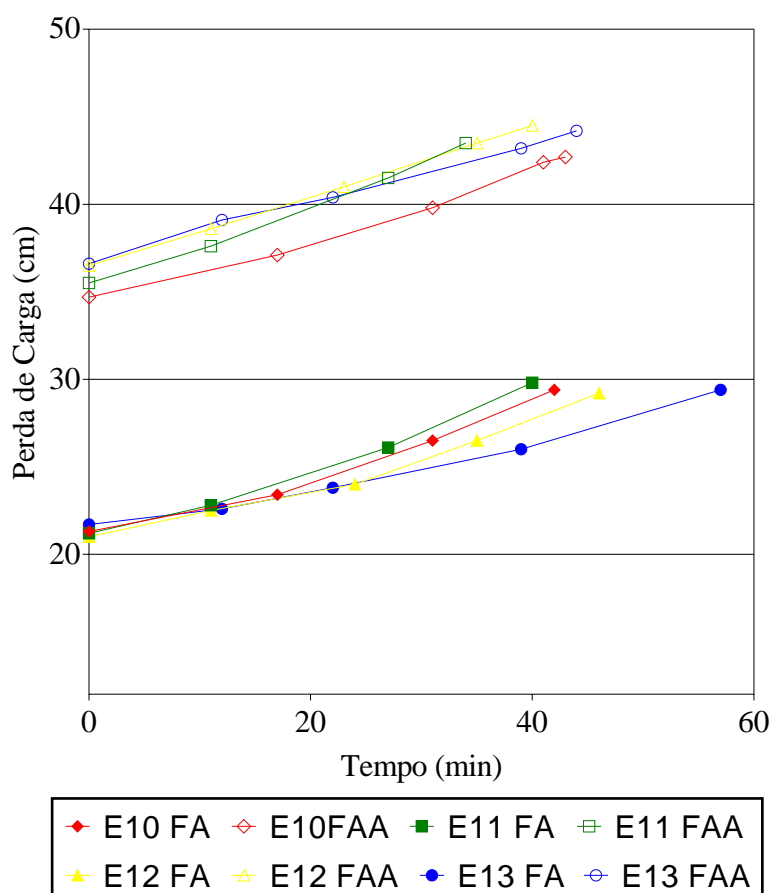


Figura 5.13 – Perdas de carga totais nos experimentos da etapa II, (taxa de filtração de  $361,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e água de alimentação floculada).

Nota-se que as perdas de carga nos experimentos E10 e E11, crescem mais rápido que as perdas de carga nos experimentos E12 e E13, confirmando a maior retenção de impurezas e melhor qualidade de água produzida.

Na Tabela 5.11 são apresentadas as durações de carreira de filtração obtidas na instalação piloto, a contribuição de cada manancial de abastecimento e a dosagem de coagulante, durante a realização dos experimentos da Etapa II, com água floculada.

A partir da Tabela 5.11, percebe-se que houve diferenças entre as condições dos experimentos, que podem elucidar os diferentes comportamentos observados. Nos experimentos E10 e E11, o córrego Bananal apresentava menor contribuição na vazão afluente a ETA.

Tabela 5.11 – Percentuais de contribuição dos mananciais de captação de água para abastecimento, dosagem de coagulante e duração das carreiras de filtração na instalação piloto na Etapa II (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação floculada).

Experimento	Manancial	Dose de PAC (mg/L)	Carreira de Filtração FA (min)	Carreira de Filtração FAA (min)
<b>E10</b>	0% BN; 75% TR; 25% SM	6	41,96	41,98
<b>E11</b>	0% BN; 65% TR; 20% SM	7	37,32	37,42
<b>E12</b>	15% BN; 65% TR; 20% SM	7	45,81	38,12
<b>E13</b>	15% BN; 65% TR; 20% SM	7	59,92	44,30

BN: córrego Bananal; TR: ribeirão do Tordo; SM: reservatório Santa Maria; FA: filtro de areia e antracito; FAA: filtro de antracito e areia.

Após a adição do bombeamento no Bananal, nos experimentos E12 e E13, houve um ajuste na dosagem de coagulação. Desta forma, parece que com o incremento do bananal a coagulação, apesar da alteração da dosagem de coagulante, perdeu eficiência na desestabilização das partículas de impurezas, que não foram tão bem retidas nos filtros, como nos experimentos E10 e E11. Fato este que acarretou no aumento da duração das carreiras de filtração nos experimentos E12 e E13.

Desta forma, para água com turbidez variando entre 16 e 26 uT e com taxa de aplicação média 359,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d no filtro FA e de 339,51 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d no FAA, pode-se aplicar a metodologia de Di Bernardo e Teixeira (1991, apud Di Bernardo, 1993) para estimar a duração da carreira de filtração da ETA em escala real, operando com taxa declinante de filtração (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Duração das carreiras de filtração nos filtros piloto nos experimentos da Etapa II, (taxa de filtração de 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d e água de alimentação floculada)..

Experimento	FA (horas)	FAA (horas)
<b>E10</b>	8,39	8,40
<b>E11</b>	7,46	7,48
<b>E12</b>	9,16	7,62
<b>E13</b>	11,98	8,86

Assim, o filtro de areia FA apresentou duração de carreira de filtração média de  $9,25 \pm 1,95$  horas e o filtro de antracito e areia FAA de  $8,09 \pm 0,65$  horas. Percebe-se então que a carreira de filtração do filtro FAA apresentou menor duração, porém as carreiras do filtro FA apresentaram maior variação.

De modo geral, assim como foi observado por Cesar et al. (2005), em estudo comparativo em escala piloto entre filtro de camada simples de areia e filtro de camada dupla de antracito e areia para taxa de filtração de  $2400 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ , o filtro FAA apresentou carreiras de filtração menores, em decorrência da maior retenção de impurezas, com melhor qualidade da água produzida.

Sobre o FA, Santos (2004) analisou, também em instalação piloto, a duração da carreira de filtração de um filtro de camada simples de areia grossa para filtração direta com taxa de aplicação de  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  e observou durações de carreiras de filtração por volta de 2, 38 horas, valor próximo ao da duração média do FA na Etapa II, de 2,43 horas.

Atualmente, na ETA Brasília, os filtros são operados por 22 horas e após esse período são lavados de forma automática. O resumo dos experimentos e das estimativas das durações das carreiras de filtração para a ETA operando com taxa de filtração declinante, é apresentada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Resumo da estimativa da duração das carreiras de filtração para a ETA Brasília, operando em taxa declinante variável.

	FA			FAA		
	T Afluente (uT)	T filtrada (uT)	Carreira de filtração (h)	T Afluente (uT)	T filtrada (uT)	Carreira de filtração (h)
<b>Etapa I</b>	2,20	0,45	40,02	2,28	0,17	23,77
<b>Etapa II, Água Clarificada</b>	2,01	0,40	49,09	1,94	0,19	29,75
<b>Etapa II, Água Floculada</b>	20,12	4,44	9,25	20,23	0,58	8,09

T: Turbidez.

A partir da Tabela 5.13, percebe-se que os filtros de areia FA e de antracito e areia FAA apresentaram duração de carreiras de filtração superiores ao valor utilizado hoje na estação. Ressalta-se por fim, que o filtro FAA produziu água com turbidez residual sempre inferior a



0,5 uT, nas Etapas I e II, com água clarificada na alimentação dos filtros, atendendo a recomendação da Portaria de Consolidação MS n 5/2017, anexo XX.

## 6 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi analisada a adequação do meio filtrante e do modo de operação da ETA Brasília, a partir de estudos de filtração em escala piloto. Os principais parâmetros analisados neste trabalho foram a duração da carreira de filtração e a turbidez da água de alimentação dos filtros e da água filtrada.

A partir da realização dos experimentos com os dois meios filtrantes testados em paralelo foi possível analisar as diferenças com relação à qualidade da água produzida e com relação ao aumento da perda de carga em função da colmatação do meio filtrante.

Como o meio filtrante FA apresenta grãos maiores que o meio filtrante FAA, as perdas de carga observadas foram menores no primeiro filtro. Uma vez que a duração da carreira de filtração é função da variação de nível de água no filtro ( $N_{2c} - N_{1c}$ ), que depende da perda de carga, as durações das carreiras de filtração no filtro FA foram maiores que no filtro FAA.

Entretanto, ao se analisar também a qualidade da água produzida, constatou-se que a perda de carga menor no filtro FA significou que este filtro não conseguiu reter tão bem as impurezas presentes na água de alimentação, como ocorreu no filtro FAA. Em todos os cenários analisados o filtro FA produziu água com turbidez residual superior a 0,5 uT. Fato que não obedece a definição da Portaria de Consolidação do MS nº 5/2017, anexo XX quanto a turbidez residual na água filtrada.

Já o filtro FAA, com exceção dos experimentos E 12 e E13 na etapa II com água floculada, foi capaz de atender a recomendação da Portaria MS nº 2.914 de turbidez na água filtrada ser inferior a 0,5 uT. Ressalta-se que mesmo na etapa I com taxa de aplicação próxima de 455,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, o filtro FAA apresentou duração de carreira de filtração de 23,77 horas, valor superior ao da duração da ETA Brasília, que atualmente é de 22 horas.

A redução da taxa de aplicação de 455,30 para 361,73 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia entre as etapas experimentais I e II, teve efeito positivo na duração das carreiras de filtração e na qualidade da água filtrada. Esta redução de taxa acarretou em um acréscimo de aproximadamente 20% na duração das respectivas carreiras de filtração.

Conclui-se, portanto, dos experimentos realizados que o filtro de camada dupla de antracito e areia FAA se mostra como uma boa alternativa para a ETA Brasília, uma vez que apresentou carreiras de filtração com duração superior a duração das carreiras atuais da ETA, além de a água produzida por este filtro atender o critério de turbidez residual estabelecido na Portaria de Consolidação do MS nº 5/2017, anexo XX.

Para pesquisas futuras sugere-se: estudar o efeito da turbidez da água de alimentação e das condições de coagulação sobre o desempenho dos filtros (qualidade e duração da carreira de filtração); estudar o desempenho de um filtro de camada única de areia praticamente uniforme com granulometria um pouco inferior ao do avaliado no presente estudo; estudar a distribuição granulométrica no filtro de camada dupla de antracito e areia, de modo minimizar a mistura das camadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akgiray, Ö e Saatçi, A.M. (1998). "An algorithm for bank operation of declining rate filters". *Water Res*, **32**(7), 2095–2105.
- Amirtharajah, A. e Mills, K.M. (1982). "Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation". *Journal of American Water Works Association*, **74**(4), 210-216.
- Arboleda, V.J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. McGraw-Hill, Santa Fé de Bogotá, Colômbia, 793p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR12.216 (1992). Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público, Rio de Janeiro.
- Barreto, M.R., Braga, F.M.G. e Brandão, C.C.S. (2015). "Avaliação de custos de processos em estações de tratamento de água convencionais no Distrito Federal - estudo de caso da reforma da ETA Brasília". Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - Abes, Rio de Janeiro, Brasil.
- Bof, J. G. (2007). Remoção de turbidez e fitoplâncton por meio da sedimentação e da flotação, com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio: avaliação em escala de bancada. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 141p.
- Braga, F.M.G. (2005). Dupla Filtração em Filtros Ascendentes de Pedregulho e Filtros Descendentes de Areia Aplicada à Remoção de Algas: Influência da Taxa de Filtração e Granulometria do Filtro de Areia. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.
- Brasil. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm). Acesso em: 1 jun 2018.
- Brasil. Ministério da Saúde. Portaria n. 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os

procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União n. 239, Seção 1, p.39, 14 dez 2011. Disponível em:

[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html).

Acesso em: 2 jun 2018.

Bratby, J.R. (1986). “Optimizing direct filtration in Brasilia”. *Journal of the American Water Works Association*, **78**(6), 106-115.

Brink, N.C.P. (2009). Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 363p.

Caesb (2011). Manual de operação da ETA Brasília. Brasília, Distrito Federal, 223p.

Caesb (2014). Siagua - Sinopse do Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal. 22ª Edição. Brasília, Distrito Federal, 147p.

Centurione Filho, P.L. (2002). Desenvolvimento e operação de uma instalação de flotação de bancada para águas de abastecimento. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 320p.

Cezar, M. C. M. ; Bertolossi, V. M. ; Souza, T. B. ; Brandão, C. C. S. . Seleção de meio filtrante para utilização em eta com processo de flotação por ar dissolvido seguido de filtração rápida com opção para filtração direta, para tratamento de água com presença de algas estudo de caso - ETA Brasília. In: 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande. Anais do 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. v. Unico. p. 1-9.

Codeplan (2016). Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios do Distrito Federal – PDAD 2015. Brasília, Distrito Federal, 149p.

Costa, E.R.H. (2001). Avaliação do funcionamento de uma instalação de filtração direta descendente com taxa declinante variável em escala real e piloto. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 285p.

Dabrowski, W. (2006). “The progression of flow rates in variable declining rate filter

systems”. *CLEAN - Soil Air Water*, **34**(5), 442-452.

Di Bernardo, L e Sabogal Paz, L.P. (2008). Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. Editora LdiBe, São Carlos, Brasil, 1560p.

Di Bernardo, L. (1986). Hidráulica da filtração com taxa declinante. *Revista DAE*, **46**(146), 259 -267.

Di Bernardo, L. (1993). Métodos e técnicas de tratamento de água. ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, 503p.

Di Bernardo, L. e Dantas, A.D.B. (2005). Métodos e técnicas de tratamento de água. Editora RiMa, São Carlos, Brasil, 792p.

Di Bernardo, L., Brandão, C.C.S. e Heller, L. (1999). Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 114p.

Di Bernardo, L., Mendes, C.G.N., Brandão, C.C.S., Sens, M. L. e Pádua, V. L. (2003). Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta. 1. ed. RIO DE JANEIRO: ABES, 480p.

Eyvaz, M., Akgiray, Ö. e Yuksel, E. (2015). “An experimental investigation on the hydraulic behavior of declining rate filtration”. *Desalination and Water Treatment*, **51**(31), 6137-6147.

Gabriel, J.C. (2000). Proposição de novo método gráfico e modelo matemático para determinação das condições de funcionamento de sistemas de filtração rápida com taxa declinante. Dissertação de Mestrado apresentada a Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

Guimarães, G.C. (2007). Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

Heller, L. e Pádua, V.L. (2006). Abastecimento de água para consumo humano. Editora UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 857p.

- HELLER, L. *et al.* (2004). “Oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*: circulação no ambiente e riscos à saúde humana”. *Epidemiol. Serv. Saúde*, **13**(2), 79-92.
- Howe, K.J. *et al.* (2012). *Principles of Water Treatment*. John Wiley & Sons, 654p.
- Huaraca, M.R.H. (2015). Estudio de factibilidad para el cambio de tasa constante a tasa declinante en el sistema de filtración de la planta de tratamiento puengasí. Projeto prévio para a obtenção do título em Engenharia Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Equador 123p
- Machado, R., e Di Bernardo, L. (1995). Proposição de modelação matemática para sistemas de filtração com taxa declinante variável incluindo armazenamento de água a montante dos filtros. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Mendes, C.G.N., Gabriel, J.C. (2000). "Hidráulica da filtração com taxa declinante: nova solução gráfica iterativa para determinação de níveis e taxas de filtração operacionais". Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – Abes, Rio de Janeiro Brasil.
- Nusch, E. A. (1980). “Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination”. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 14:14-36.
- Rezende, S. C. e Heller, L.O. (2002). *Saneamento no Brasil: políticas e interfaces*. Editora UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 387p.
- Santos, E.P.C.C. (2004). Coagulação da água da represa Vargem das Flores visando tratamento por filtração direta. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 167p.
- Torres, L.M.P., Lozada, P.T. e Vélez, C.H. (2014). “Influence of the Flow Control (Declining Rate – Constant Rate) on the Filtration Process in Drinking Water Treatment”. *Ingeniería y Universidad*, **18**(2), 217-234.